

УДК 549.514.8-9:551.22(477.75)

НОРИЛЬСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ: НОВАЯ МЕТАМОРФОГЕННО-ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ МИНЕРАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ — БЕСПРИМЕСНЫЕ ЗВЯГИНЦЕВИТ И СЕРЕБРО, ХИББИНГИТ, Mn-ХИББИНГИТ, СИДЕРИТ, СФАЛЕРИТ И ФОСГЕНИТ В МАГМАТОГЕННЫХ ПУТОРАНИТОВЫХ РУДАХ

Эрнст Максович Спиридонов^{1✉}, Юлия Алексеевна Иванова²,
Даниил Игоревич Наумов³, Наталья Николаевна Коротаева⁴,
Алефтина Александровна Серова⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ✉ ernstspiridon@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yuliaivanova5666@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Nden97@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Nkorotaeva@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; A.Serova@mail.ru

Аннотация. На глубоких горизонтах (>1750 м) северо-восточного фланга Октябрьского месторождения Норильского рудного поля развиты уникальные магматогенные руды — крупнозернистые агрегаты поторанита $[(\text{Fe}_{17.6-17.9}\text{Ni}_{0.4-1.1}\text{Co}_{0-0.1})_{18-19}\text{Cu}_{15.8-17.0}]_{35}\text{S}_{32}$ с решеткой ламеллы распада моихукита $[(\text{Fe}_{17.8-18.0}\text{Ni}_{0.2-0.3}\text{Co}_{0-0.1})_{18.2-18.3}\text{Cu}_{17.7-17.8}]_{36}\text{S}_{32}$ и обособленного пентландита с 1,75 масс.% Co, его состав — $(\text{Ni}_{4.41}\text{Fe}_{4.36}\text{Co}_{0.23})_9\text{S}_8$. Руды содержат пневматолитовые станнопалладинит Pd_5CuSn_2 , полярит $\text{Pd}(\text{Bi},\text{Pb})$, плюмбополярит $\text{Pd}(\text{Pb},\text{Bi})$, тетраферроплатину $\text{Pt}_2\text{Fe}(\text{Fe},\text{Cu},\text{Ni})$, туламинит $\text{Pt}_2\text{Fe}(\text{Cu},\text{Fe},\text{Ni})$ и кюстелит (Ag,Au) . В тектонизированных рудах развиты обильный борнит и более поздние агрегаты хиббингита и марганцовистого хиббингита $(\text{Fe}^{2+},\text{Mn}^{2+})_2(\text{OH})_3\text{Cl}$, сидерита и марганцовистого сидерита $(\text{Fe}^{2+},\text{Mn}^{2+})[\text{CO}_3]$, замесившие магнетит, и сульфиды Cu, Fe, Ni. Беспримесные звягинцевит Pd_3Pb и серебро слагают сингенетичные включения в агрегатах хиббингита и сидерита. Беспримесный звягинцевит замещает и пневматолитовые полярит и плюмбополярит, за счет вещества которых, вероятно, возник метаморфогенно-гидротермальный звягинцевит. Этот звягинцевит резко отличен от пневматолитового звягинцевита отсутствием в его составе Pt, Sn, Bi, Sb, Hg. Впервые обнаруженный гипогенный фосгенит $\text{Pb}_2[\text{Cl}_2/\text{CO}_3]$ слагает псевдоморфозы по галениту, иногда в сростании с хиббингитом. Описанная новая в норильских рудах минеральная ассоциация — низкотемпературная метаморфогенно-гидротермальная — возникла при участии углекислотно-хлоридных растворов в восстановительных условиях. Более поздние гизингерит, борнит, барит, замещающие хиббингит и сидерит, возникли при повышенной фугитивности O_2 .

Ключевые слова: поторанит, моихукит, станнопалладинит, полярит, плюмбополярит, туламинит, тетраферроплатина, кюстелит, метаморфогенно-гидротермальные беспримесные звягинцевит и серебро, хиббингит, марганцовистый хиббингит, сидерит, фосгенит, Норильское рудное поле

Для цитирования: 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, Mn-хиббингит, сидерит, сфалерит и фосгенит в магматогенных поторанитовых рудах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 3. С. 70–82.

NORILSK ORE FIELD: THE NEW METAMORPHIC-HYDROTHERMAL MINERAL ASSOCIATION — PURE ZVYAGINTSEVITE AND SILVER, HIBBINGITE, Mn-HIBBINGITE, SIDERITE, SPHALERITE AND PHOSGENITE IN THE MAGMATOGENIC PUTORANITE ORES

Ernst M. Spiridonov^{1✉}, Yulia A. Ivanova², Daniil I. Naumov³,
Natalia N. Korotaeva⁴, Alefina A. Serova⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ernstspiridon@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; yuliaivanova5666@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Nden97@gmail.com

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Nkorotaeva@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; A.Serova@mail.ru

Abstract. The unique magmatogenic putoranite ores are developed within deep horizons (>1750 m) of the northeastern flank of the October deposit in the Norilsk ore field. These are coarse-grained putoranite aggregates with lamellae of moihokite and isolated pentlandite disproportionation. The composition of putoranite is:

[(Fe_{17.6–17.9}Ni_{0.4–1.1}Co_{0–0.1})_{18–19}Cu_{15.8–17.0}]₃₅S₃₂; the composition of moihokite is: [(Fe_{17.8–18.0}Ni_{0.2–0.3}Co_{0–0.1})_{18.2–18.3}Cu_{17.7–17.8}]₃₆S₃₂; pentlandite contains 1,75 wt% of Co, its composition is: (Ni_{4.41}Fe_{4.36}Co_{0.23})₉S₈. Ores hold pneumatolytic stannopalladinite Pd₅CuSn₂, polyarite Pd(Bi,Pb), plumbopolyarite Pd(Pb,Bi), tetraferroplatinum Pt₂Fe(Fe,Cu,Ni), tulameenite Pt₂Fe(Cu,Fe,Ni) and kustelite (Ag,Au). Bornite is widespread in tectonized ores, as well as late hibbingite and Mn hibbingite (Fe²⁺,Mn²⁺)₂(OH)₃Cl, siderite and Mn siderite (Fe²⁺,Mn²⁺)[CO₃] aggregates, replaced magnetite and Cu-Fe-Ni sulphides. Pure zvyagintsevite Pd₃Pb and native silver compose syngenetic inclusions in hibbingite and siderite aggregates. Similar zvyagintsevite replaces pneumatolytic polyarite and plumbopolyarite. Metamorphogenic-hydrothermal zvyagintsevite probably arose from their material. This zvyagintsevite is sharply different from pneumatolytic zvyagintsevite by the absence of Pt, Sn, Bi, Sb and Hg in its composition. The first detected hypogenic phosgenite Pb₂[Cl₂/CO₃] forms pseudomorphoses after galena, sometimes with hibbingite. The described low-temperature metamorphogenic-hydrothermal mineral association arose involving carbon dioxide-chloride solutions in reducing conditions. Later metamorphogenic-hydrothermal hisingerite, bornite and barite, partially replacing hibbingite, siderite and Cu-Fe-Ni sulfides, arose with an increased fugacity O₂.

Keywords: putoranite, moihokite, stannopalladinite, polyarite, plumbopolyarite, tulamine, tetraferroplatinum, kustelite, metamorphogenic-hydrothermal pure zvyagintsevite and silver, hibbingite, Mn hibbingite, siderite, phosgenite, Norilsk ore field

For citation: Spiridonov E.M., Ivanova Yu.A., Naumov D.I., Korotaeva N.N., Serova A.A. Norilsk ore field: the new metamorphic-hydrothermal mineral association — pure zvyagintsevite and silver, hibbingite, Mn-hibbingite, siderite, sphalerite and phosgenite in the magmatogenic putoranite ores. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 3: 70–82 (In Russ.).

Введение. Норильские руды не перестают удивлять своеобразными минеральными образованиями. При доразведке глубоких горизонтов (глубже 1750 м) северо-восточного фланга Октябрьского месторождения геологи Норильскгеологии обнаружили уникальные магматогенные путоранитовые руды необычного насыщенного сиренево-розового цвета, которые содержат и своеобразную позднюю низкотемпературную минерализацию. По нашим данным, минеральный состав горных пород и руд Норильского рудного поля сформирован в два этапа: 1-й этап — синтрапповая магматогенная минерализация с пневматолитовым продолжением, 2-й этап — посттрапповая эпигенетическая метаморфогенно-гидротермальная минерализация [Спиридонов и др., 2000, 2015, 2021a,б; Спиридонов, Гриценко, 2009; Спиридонов, 2010; Spiridonov et al., 2016]. Образования 2-го этапа ранее рассматривали как производные трапповой формации [Годлевский, Шумская, 1960; Золотухин и др., 1967; Кулагов и др., 1969; Золотухин, 1970; Генкин и др., 1981; Степанов, Туровцев, 1988; Дистлер и др., 1999] или как продукты региональной гидротермальной деятельности [Горяинов, Аглонов, 1980]. В статье описаны путоранитовые руды 1-го этапа с характерными решетчатыми микросрастаниями путоранита и моихукита и новая для рудного поля минеральная ассоциация 2-го этапа, включающая беспримесные звягинцевит и серебро, хиббингит, сидерит, впервые установленный гипогенный фосгенит, Cd-сфалерит.

Норильское рудное поле. Норильское рудное поле размещено в северо-западном углу дорифейской Восточно-Сибирской платформы, в области краевых дислокаций [Маслов, 1963; Люлько и др., 1987]. Магматогенные Ag–Au–Pt–Pd–Co–Ni–Cu месторождения сопряжены с интрузивами норильского типа, одними из наиболее поздних производных грандиозной сибирской трапповой формации [Годлевский, 1959; Маслов, 1963; Степанов, Туровцев,

1988 и др.]. Эти интрузивы пересекали смятые совместно в пологие брахисинклинали вулканические толщи трапповой формации от нижней ивакинской свиты до верхней самоедской [Степанов, Туровцев, 1988; Спиридонов и др., 2000].

Норильские руды — продукты кристаллизации сульфидных расплавов, слагают залежи и жилы, импренции и вкрапленность в интрузивных породах и роговиках рамы интрузивов. Первичные руды сложены продуктами субсолидных превращений высокотемпературных сульфидных твердых растворов — это разнообразный пирротин, троилит, кубанит, пентландит, халькопирит, талнахит, моихукит, путоранит, а также магнетит и титаномагнетит [Годлевский, 1959; Филимонова и др., 1974; Филимонова, Евстигнеева, 1980; Генкин и др., 1981; Степанов, Туровцев, 1988; Дистлер и др., 1999]. Каждое тело магматогенных сульфидов — от малых капель до крупных залежей — окружено ореолами флюидного воздействия с биотитом-флогопитом, амфиболами, апатитом, богатыми хлором и фтором; магнетитом, титаномагнетитом, ильменитом, бадделеитом, ортитом. Масштаб ореолов флюидного воздействия коррелирует с размером сульфидных тел и изменяется от нескольких миллиметров до 10 м и более. Большая часть Pd, Pt, Au и Ag в первичных норильских рудах образует в них интерметаллиды и близкие к ним теллуриды, висмутиды, станниды, антимониды, арсениды, плумбиды, сульфидов среди них нет [Изоитко, 1997; Спиридонов, 2010]. Ареалы минералов благородных металлов шире контуров сульфидных залежей и соответствуют ореолам флюидного воздействия. Минералы благородных металлов слагают метасомы и метакристаллы, замесившие магматогенные сульфиды [Генкин и др., 1981]. Эти минералы благородных металлов — послемагматические пневматолитовые (флюидно-метасоматические) образования [Спиридонов, 2010; Спиридонов и др., 2015].

Проявления эпигенетического метаморфизма в Норильском рудном поле. Участки Восточно-Сибирской платформы, покрытые толщей платобазальтов мощностью до 5 км и насыщенные интрузивами габбро-долеритов, затем испытали трапповое погружение. Трапповая формация и подтрапповые толщи были захвачены эпигенетичным метаморфизмом в условиях цеолитовой, затем пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций. Фации метаморфизма определены по минеральным ассоциациям по аналогии с данными [Philpotts, Ague, 2009]. Rb-Sr возраст процессов метаморфизма: первая датировка — 232 млн лет, последняя — 122 млн лет; максимальные параметры метаморфизма — 180–250 МПа и 310–330 °C; эпигенетические образования моложе трапповой формации на 20–130 млн лет [Spiridonov et al., 2016].

В Норильском рудном поле эффузивные и рудоносные интрузивные траппы и сопряженные магматогенные сульфидные Co-Ni-Cu руды метаморфизованы синхронно и однотипно [Спиридонов и др., 2000; Спиридонов, Гриценко, 2009; Spiridonov et al., 2016]. В первичных сульфидных рудах вдоль трещин, зон дробления и милонитизации в виде отдельных вростков, пятен, гнезд, микро- и макропрожилков, захватывая крупные блоки рудных залежей, развиты пирит, Ni-пирит, графические сростания пирита и магнетита, а также халькопирита и магнетита (без структур распада), миллерит, валлериит, макинавит, низкие борнит и халькозин, гизингерит, хизлевудит, годлевскит, полидимит, гематит, игольчатый кубанит, сфалерит, вюртцит, галенит, кобальт-, купро- и аргентопентландит, паркерит, шэндит, гаухекорнит, точилинит, алабандин, гетит, самородные серебро, мышьяк и висмут, сульфоарсениды, арсениды, сульфоантимониды и антимониды Fe-Ni-Co, клаусталит, касситерит, станнин, хоулит, уранинит, антимонит, киноварь [Годлевский, Шумская, 1960; Будько и др., 1966; Золотухин и др., 1967; Кулагов и др., 1969; Золотухин, 1970; Рябов, 1975; Горяинов, Аглонов, 1980; Генкин и др., 1981; Спиридонов, Гриценко, 2009; Спиридонов, 2010, 2021a, 2021b; Spiridonov et al., 2016]. Обычно с ними ассоциируют ангидрит, кальцит, доломит, анкерит, хлорит, кварц, пренит, гидрогранаты, серпентины, брусит, ксонотлит, сапонит, стильпномелан, пектолит, тоберморит, датолит, апофиллит, ильваит, бабингтонит, халцедон, цеолиты (ломонтит, стильбит, шабазит и др.), окенит, тальк, минералы группы гидроталькита, барит, таумасит, айоваит, антраксолит, нефтяные битумы, парафины в виде вкрапленности, гнезд и жил.

Изотопный состав Pb галенита метаморфогенно-гидротермальных жил, залегающих среди метаморфизованных норильских руд, иной, чем Pb первичных норильских руд. Свинец этих жил — коровый, что свидетельствует о независимости источника Pb метаморфогенно-гидротермальных жил от траппов [Спиридонов и др., 2010].

Указанные образования возникли при воздействии умеренно- и малосолёных углекисло-хлоридных флюидов с изменчивыми фугитивностью O_2 и щелочностью. Это растворы NaCl–MgCl₂ с солёностью от 15 до 0,4 масс.% эквивалента NaCl (приблизительно 2/3 флюидных включений) и растворы NaCl–CaCl₂ ($\pm NaHCO_3$) с солёностью от 23 до 6,5 масс.% экв. NaCl (1/3 включений) с температурой от 270 (обычно от 250–216) до 140–120 °C и давлением от 120 до 30 МПа [Спиридонов, Гриценко, 2009].

Метаморфогенно — гидротермальная Pt-Pd-Ag минерализация в норильских рудах. Эта минерализация развита среди метаморфизованных сульфидных руд, богатых благородными металлами. Метаморфогенно-гидротермальные минералы серебра — самородное серебро, не содержащее золота, аргентопентландит AgFe₅Ni₃S₈, более редкие — твердый раствор халькопирит—ленаит AgFeS₂, серебросодержащий борнит. Метаморфогенно-гидротермальные минералы палладия и платины представлены паоловитом, не содержащим Sb и Au, висоцкитом, куперитом, брэггитом, палладийсодержащими брейтгауптитом и орселитом, палладоарсенидом, винсентитом, хараелахитом, фрудитом, соболевскитом, малышевитом, самородными палладом и платиной [Спиридонов, 2010, 2021a, б; Spiridonov et al., 2016]. Интерметаллиды палладия (паоловит, фрудит, соболевскит) и его арсениды (палладоарсенид, винсентит) развиты среди руд, метаморфизованных при повышенной фугитивности O_2 и низкой активности S_2 , а также среди руд, богатых ангидритом и магнетитом, борнитом или халькозином, с хизлевудитом Ni₃S₂, касситеритом, оловосодержащими гидрогранатами. Палладийсодержащие сульфиды (висоцкит, брэггит, куперит, хараелахит, малышевит) развиты среди руд с миллеритом NiS и полидимитом Ni₃S₄, метаморфизованных при относительно повышенной активности S_2 [Спиридонов, 2021a; Спиридонов и др., 2021].

Материалы и методы исследований. Изучена коллекция руд глубоких горизонтов (>1750 м) с северо-восточного фланга Октябрьского месторождения. Электронные фотографии и химический анализ минералов выполнены с помощью аналитического комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ Jeol JSM-6480 LV в лаборатории локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (аналитик-исследователь Н.Н. Коротаева). В качестве эталонов использованы чистые металлы Ru, Os, Ir, Rh, Pt, Pd, Au, Ag, Bi, Sb, Cr, Ni, Co, Cu, Zn, пирит FeS₂ (S), алтаит PbTe (Pb, Te), коттунит PbCl₂ (Pb, Cl), синтетические InAs (As) и CdSe (Cd, Se). В тексте статьи и на рисунках единая сквозная нумерация химических анализов минералов.

Результаты исследований и их обсуждение. *Магматогенные пуроранитовые руды глубоких горизонтов северо-восточного фланга Октябрьского месторождения.* Эти сплошные сульфидные

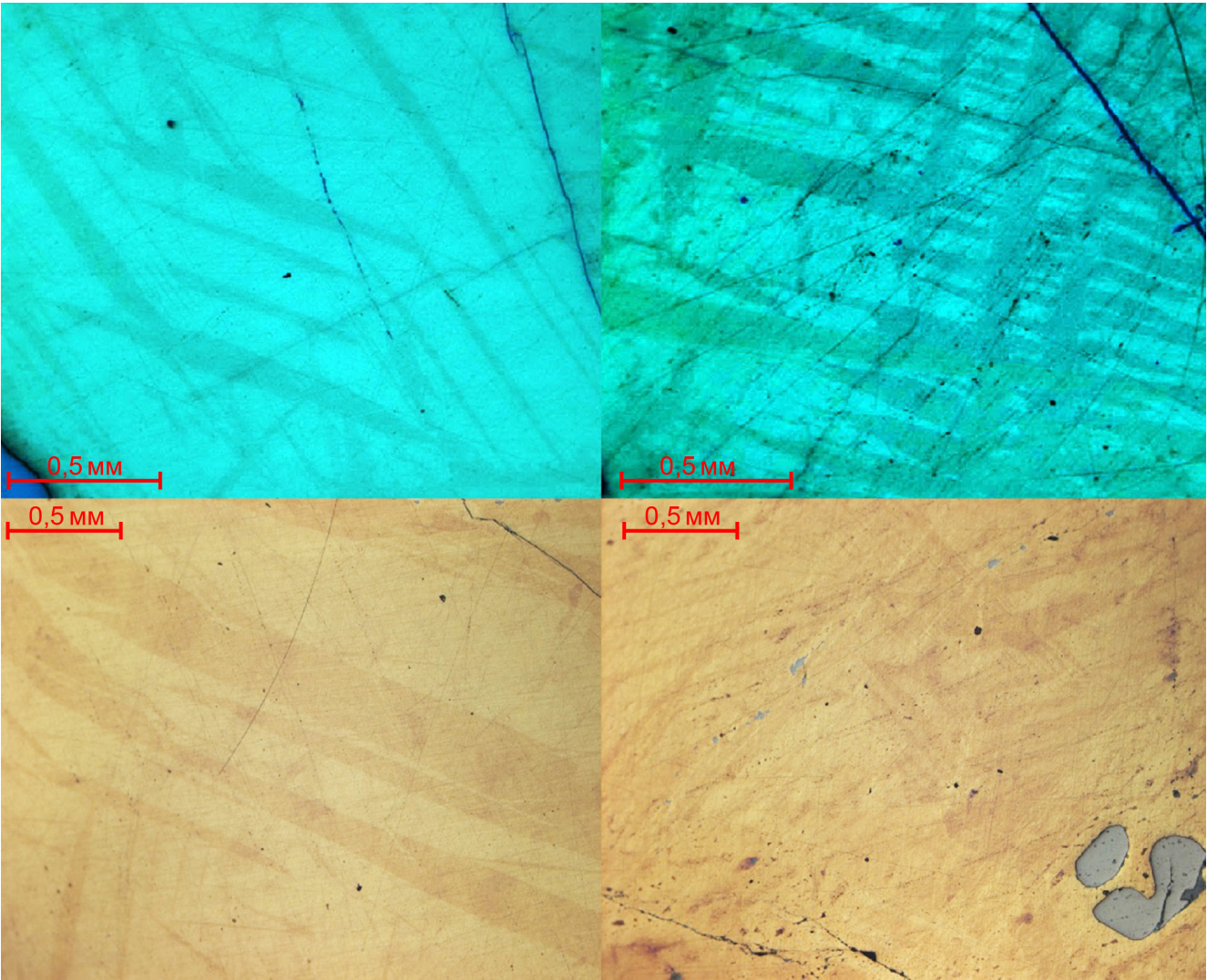


Рис. 1. Сплошные сульфидные руды. Путоранит (матрица) с ламеллями распада моихукита. В отраженном свете при одном николе

Ag-Au-Pt-Pd-Co-Ni-Cu руды слагают крупнозернистые агрегаты путоранита с пластинчатыми ламеллями распада моихукита и пентландит. Известно, что минералы группы халькопирита, недосыщенные серой, — талнахит, моихукит и путоранит — на воздухе легко и быстро покрываются цветными пленками [Филимонова и др., 1974; Филимонова, Евстигнеева, 1980]. В сростаниях путоранита и моихукита быстрее и интенсивнее изменяется окраска моихукита. Рисунок структур распада моихукита в кристаллах путоранита заметно варьирует, толщина ламеллей моихукита достигает 0,3 мм, обычно существенно меньше (рис. 1; 2А). Размер кристаллов путоранита и пентландита до 25 мм в поперечнике. Пентландит содержит 1,75 масс.% Co, его состав $(\text{Ni}_{4.41}\text{Fe}_{4.36}\text{Co}_{0.23})_9\text{S}_8$ (табл. 1, ан. 1). Вариации состава путоранита (табл. 1, ан. 2–5) отвечают $[(\text{Fe}_{17.6-17.9}\text{Ni}_{0.4-1.1}\text{Co}_{0-0.1})_{18-19}\text{Cu}_{15.8-17.0}]_{35}\text{S}_{32}$. Вариации состава моихукита более узкие и отвечают $[(\text{Fe}_{17.8-18.0}\text{Ni}_{0.2-0.3}\text{Co}_{0-0.1})_{18.2-18.3}\text{Cu}_{17.7-17.8}]_{36}\text{S}_{32}$ (табл. 1, ан. 6–7). Агрегаты сульфидов содержат мелкие включения беститанистого магнетита, местами обильные. Состав магнетита (масс.%), ан. 8:

Таблица 1
Химический состав (масс.%) пентландита (1), путоранита(2–5), моихукита (6–7) из сплошных сульфидных руд рудного тела Северное 4 с северо-восточного фланга Октябрьского месторождения Норильского рудного поля

| Компоненты | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fe | 31,42 | 32,13 | 31,57 | 31,21 | 31,58 | 31,53 | 31,14 |
| Cu | нпо | 32,37 | 33,05 | 34,36 | 33,12 | 35,32 | 35,33 |
| Ni | 33,39 | 2,04 | 1,74 | 0,71 | 1,75 | 0,31 | 0,53 |
| Co | 1,75 | 0,17 | 0,15 | нпо | 0,16 | 0,18 | 0,11 |
| S | 33,09 | 33,10 | 32,80 | 32,56 | 32,76 | 32,16 | 32,09 |
| Сумма | 99,65 | 99,81 | 99,31 | 98,84 | 99,37 | 99,50 | 99,20 |
| Число атомов в формуле | | | | | | | |
| Fe | 4,36 | 17,85 | 17,69 | 17,60 | 17,70 | 18,01 | 17,84 |
| Cu | - | 15,84 | 16,28 | 17,03 | 16,31 | 17,73 | 17,79 |
| Ni | 4,41 | 1,08 | 0,93 | 0,38 | 0,93 | 0,17 | 0,29 |
| Co | 0,23 | 0,09 | 0,08 | - | 0,08 | 0,10 | 0,026 |
| Сумма | 9,00 | 34,86 | 34,98 | 35,01 | 35,02 | 36,01 | 35,98 |
| S | 8,00 | 32 | | | | | |

Примечание. Здесь и далее: нпо — ниже предела обнаружения; Ag, Zn, Se, Pd не обнаружены.

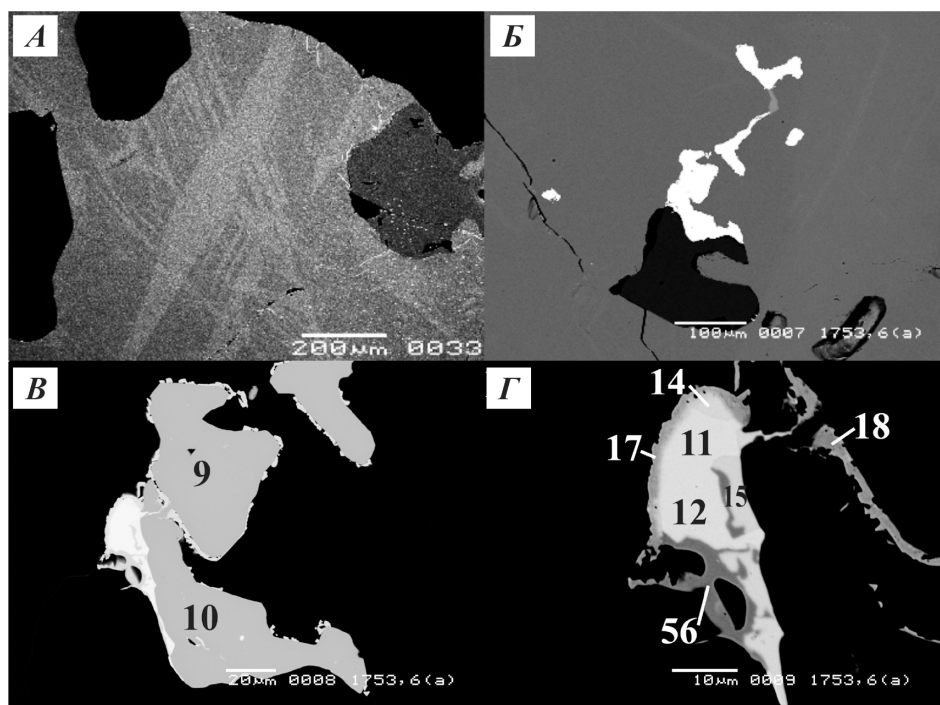


Рис. 2. Сплошные сульфидные руды с включениями магнетита (черное), пуроранит (матрица) с ламеллями распада моихукита (более светлые пластины) (А); гнездо метакристаллов минералов платиновых металлов (белое) в сульфидной матрице с включениями магнетита (темно-серое) и силикатов (черное) (Б); гнездо метакристаллов станнопалладинита (светло-серое, ан. 9, 10) и полярита (белое) с оторочками тетраферроплатины и туламинита (серое) в сульфидной матрице (В); полярит (белое, ан. 11, 12, 14, 15) с каймами тетраферроплатины (ан. 17) и туламинита (ан. 18) и метасоматическими вростками позднего звягинцевита (темно-серое, ан. 56) (Г). В отраженных электронах. Цифрами показаны места и номера анализов

FeO 30,51; MnO 0,46; Fe₂O₃ 68,83; сумма 99,80%, формула $(\text{Fe}^{2+}_{0.985}\text{Mn}_{0.015})_1\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$; характерна заметная примесь марганца. Галенит слагает мелкие (до 15 мкм) рассеянные выделения.

Интерметаллиды благородных металлов слагают цепочки метакристаллов среди агрегатов сульфидов Fe-Cu-Ni (рис. 2, Б). В этом типе руд развиты минералы платиновых металлов с Bi и Sn, бедные Te, As и Sb. Наиболее ранний из них — станнопалладинит Pd_5CuSn_2 (рис. 2, В) (табл. 2, ан. 9, 10), его формулы — $(\text{Pd}_{4.60}\text{Pt}_{0.39})_{4.99}\text{Cu}_{1.03}(\text{Sn}_{1.92}\text{Te}_{0.03}\text{Cd}_{0.02})_{1.97}$ и $(\text{Pd}_{4.64}\text{Pt}_{0.32})_{4.96}\text{Cu}_{1.00}(\text{Sn}_{1.97}\text{Te}_{0.05}\text{Cd}_{0.02})_{2.04}$. Со станнопалладинитом часто ассоциирует обрастающий его полярит $\text{Pd}(\text{Bi},\text{Pb})$ (рис. 2, В) (табл. 2, ан. 11–16). Обычно метакристаллы полярита развиты среди пуроранита и пентландита, такой полярит по составу существенно висмутистый $\text{PdBi}_{0.8-1}\text{Pb}_{0.2-0}$ (табл. 2, ан. 11–15). Реже полярит замещает галенит, такой полярит существенно свинцовистый, это плюмбополярит с составом $\text{PdBi}_{0.3}\text{Pb}_{0.7}$ (табл. 2, ан. 16). В полярите палладий в малой степени замещают Pt, Rh и Au, висмут и свинец — замещают Tl, Hg, Cd.

Станнопалладинит и полярит окружены каймами тетраферроплатины $\text{Pt}_2\text{Fe}(\text{Fe},\text{Cu},\text{Ni})$ и туламинита $\text{Pt}_2\text{Fe}(\text{Cu},\text{Fe},\text{Ni})$ (рис. 2, В, Г). В этих интерметаллидах платина в небольшой степени замещена Pd, заметно варьируют соотношения Fe, Cu, Ni (табл. 3, ан. 17–20). Пуроранитовые руды содержат единичные мелкие выделения иных пневматолитовых минералов платиновых металлов, это маякит $\text{Pd}_{1.02}\text{Ni}_{0.98}\text{As}_{1.01}$ (табл. 3, ан. 21); обогащенный Pb паларстанид $(\text{Pd}_{4.96}\text{Pt}_{0.04})_{5.00}(\text{Sn}_{0.91}\text{As}_{0.62}\text{Pb}_{0.26}\text{Te}_{0.18}\text{Bi}_{0.03})_{2.00}$ (табл. 3, ан. 22); обогащенный Pb теларгпалит $(\text{Pd}_{2.05}\text{Ag}_{0.93})_{2.98}(\text{Te}_{0.86}\text{Pb}_{0.16})_{1.02}$ (табл. 3, ан. 23); крайне богатый Pt и Sn звягинцевит $(\text{Pd}_{1.91}\text{Pt}_{1.10})_{3.01}(\text{Pb}_{0.48}\text{Sn}_{0.34}\text{Bi}_{0.13}\text{Sb}_{0.04})_{0.99}$ (ан. 24).

Наиболее поздние пневматолитовые образования в пуроранитовых рудах — богатые серебром минералы ряда Au-Ag. Это распространенный кюстелит с пробностью 199–111 (табл. 4, ан. 25–34) и более редкое золотосодержащее серебро с пробностью 97–43 (табл. 4, ан. 35–37). Вероятная причина обилия серебра в минералах ряда Au-Ag заключается в том, что руды формировались при низкой активности Te во флюидах.

Метаморфизованные сульфидные руды глубоких горизонтов северо-восточного фланга Октябрьского месторождения. Магматогенные сульфидные руды глубоких горизонтов северо-восточного фланга Октябрьского месторождения неравномерно тектонизированы и захвачены много-стадийным низкоградным метаморфизмом. Распространены относительно ранние околотрещинные и гнездовые зернистые агрегаты борнита и магнетита (\pm хлорит), замещающие пуроранит, моихукит и отчасти пентландит, а также прожилки магнетита и хлорита. Ассоциация метаморфогенных борнита и магнетита широко развита в Норильском рудном поле [Spiridonov et al., 2016]. Наибольший интерес представляют более поздние низкотемпературные образования, возникшие после дополнительного импульса тектонизации (рис. 3). Это агрегаты хиббингита и сидерита с включениями беспримесных звягинцевита и серебра, замесившие магнетит и прилегающие сульфиды Cu-Fe-Ni; фосгенит и звягинцевит, замесившие галенит; звягинцевит того же состава, частично замесивший пневматолитовые полярит и плюмбополярит.

Хиббингит и марганцовистый хиббингит. Хиббингит — $\text{Fe}^{2+}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ — хлорид-гидроксид двухвалентного железа, редкий гипергенный минерал, продукт выветривания железных метеоритов и

Таблица 2

Таблица 3

Химический состав (масс.%) пневматолитовых станнопалладинита (9–10), полярита (11–15) и плюмбополярита (16) в пугоранитовых рудах рудного тела Северное 4 на северо-восточном фланге Октябрьского месторождения Норильского рудного поля

| Компо- ненты | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Pd | 55,34 | 57,05 | 33,27 | 31,99 | 32,29 | 32,33 | 31,49 | 32,79 |
| Pt | 8,66 | 7,22 | нпо | нпо | нпо | нпо | 0,73 | 2,53 |
| Rh | нпо | нпо | 0,42 | 0,87 | 0,42 | 0,88 | 0,71 | 1,02 |
| Au | нпо | нпо | нпо | 0,99 | 1,11 | 0,87 | 1,17 | нпо |
| Cu | 7,42 | 7,35 | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо |
| Sn | 25,71 | 26,95 | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 0,52 |
| Te | 0,49 | 0,73 | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо |
| Bi | нпо | нпо | 66,07 | 64,01 | 56,71 | 57,25 | 54,27 | 21,17 |
| Pb | нпо | нпо | нпо | нпо | 7,49 | 6,71 | 8,87 | 42,74 |
| Tl | нпо | нпо | нпо | 0,90 | 1,16 | 1,04 | 1,28 | нпо |
| Hg | нпо | нпо | нпо | 0,82 | нпо | 0,83 | 0,75 | 1,07 |
| Cd | 0,27 | 0,25 | нпо | нпо | 0,28 | 0,29 | нпо | нпо |
| Сумма | 97,89 | 99,55 | 99,76 | 99,58 | 99,46 | 100,20 | 99,27 | 101,84 |
| Число атомов в формуле | | | | | | | | |
| Pd | 4,602 | 4,644 | 0,988 | 0,956 | 0,965 | 0,957 | 0,947 | 0,950 |
| Pt | 0,393 | 0,320 | – | – | – | – | 0,012 | 0,040 |
| Rh | – | – | 0,013 | 0,027 | 0,013 | 0,027 | 0,022 | 0,031 |
| Au | – | – | – | 0,016 | 0,018 | 0,014 | 0,019 | – |
| Сумма | 4,995 | 4,964 | 1,001 | 0,999 | 0,996 | 0,998 | 1,000 | 1,021 |
| Cu | 1,033 | 1,002 | – | – | – | – | – | – |
| Сумма | 1,033 | 1,002 | – | – | – | – | – | – |
| Sn | 1,917 | 1,966 | – | – | – | – | – | 0,014 |
| Te | 0,034 | 0,049 | – | – | – | – | – | – |
| Bi | – | – | 0,999 | 0,974 | 0,863 | 0,863 | 0,831 | 0,312 |
| Pb | – | – | – | – | 0,115 | 0,102 | 0,137 | 0,637 |
| Tl | – | – | – | 0,014 | 0,018 | 0,016 | 0,020 | – |
| Hg | – | – | – | 0,013 | – | 0,013 | 0,012 | 0,016 |
| Cd | 0,021 | 0,019 | – | – | 0,008 | 0,008 | – | – |
| Сумма | 1,972 | 2,034 | 0,999 | 1,001 | 1,004 | 1,002 | 1,000 | 0,979 |

Примечание. Ru, Os, Ir, Ag, Sb, As не обнаружены.

древних изделий из железа [Buchwald, Koch, 1995]. В последние годы был описан эндогенный хиббингит среди поздних низкотемпературных образований в Pt-Pd рудах Дулута [Saini-Eidukat et al., 1994], а затем и Норильска, а также среди поздних низкотемпературных образований в скарновых железных рудах Коршуновского месторождения [Saini-Eidukat et al., 1998]. В норильских рудах развит не только хиббингит, но и богатый марганцем хиббингит, член изоморфного ряда хиббингит—кемпит $Mn^{2+}_2(OH)_3Cl$ [Saini-Eidukat et al., 1998].

В метаморфизованных сульфидных рудах глубоких горизонтов (глубже 1750 м) северо-восточного фланга Октябрьского месторождения

Химический состав (масс.%) пневматолитовых тетраферроплатины (17), туламинита(18–20), маякита (21), паларстанида (22), теларгпалита (23), звягинцевита (24) из пугоранитовых руд рудного тела Северное 4 на северо-восточном фланге Октябрьского месторождения Норильского рудного поля

| Компо- ненты | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pt | 74,59 | 72,88 | 69,49 | 72,04 | нпо | 0,91 | нпо | 35,48 |
| Pd | 1,77 | 3,22 | 6,56 | 3,29 | 44,14 | 67,53 | 46,75 | 33,55 |
| Ag | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 21,45 | нпо |
| Fe | 16,48 | 15,66 | 15,79 | 14,48 | нпо | нпо | нпо | нпо |
| Ni | 0,69 | 2,06 | 1,79 | 0,52 | 23,36 | нпо | нпо | нпо |
| Cu | 5,65 | 5,33 | 6,73 | 8,71 | нпо | нпо | нпо | нпо |
| As | нпо | нпо | нпо | нпо | 30,74 | 5,92 | нпо | нпо |
| Pb | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 6,82 | 7,33 | 16,54 |
| Sn | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 13,83 | нпо | 6,58 |
| Te | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 2,85 | 23,67 | нпо |
| Bi | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 0,89 | нпо | 4,32 |
| Sb | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 0,84 |
| Сумма | 99,18 | 99,15 | 100,36 | 99,04 | 98,24 | 98,75 | 99,20 | 98,59 |
| Число атомов в формуле | | | | | | | | |
| Pt | 1,925 | 1,859 | 1,702 | 1,834 | – | 0,037 | – | 1,104 |
| Pd | 0,084 | 0,151 | 0,294 | 0,153 | 1,017 | 4,962 | 2,045 | 1,910 |
| Ag | – | – | – | – | – | – | 0,926 | – |
| Сумма | 2,009 | 2,010 | 1,996 | 1,987 | 1,017 | 4,999 | 2,971 | 3,014 |
| Fe | 1,485 | 1,397 | 1,352 | 1,288 | – | – | – | – |
| Ni | 0,059 | 0,175 | 0,146 | 0,044 | 0,977 | – | – | – |
| Cu | 0,447 | 0,418 | 0,506 | 0,681 | – | – | – | – |
| Сумма | 1,991 | 1,990 | 2,003 | 2,013 | 0,977 | – | – | – |
| As | – | – | – | – | 1,006 | 0,618 | – | – |
| Sn | – | – | – | – | – | 0,911 | – | 0,336 |
| Pb | – | – | – | – | – | 0,257 | 0,165 | 0,484 |
| Te | – | – | – | – | – | 0,181 | 0,864 | – |
| Bi | – | – | – | – | – | 0,034 | – | 0,126 |
| Sb | – | – | – | – | – | – | – | 0,040 |
| Сумма | – | – | – | – | 1,006 | 2,001 | 1,029 | 0,986 |

Примечание. Ru, Os, Ir, Rh, Au, Cd, Hg, Co не обнаружены.

хиббингит слагает частичные и полные псевдоморфозы по магнетиту (рис. 4), замещает минералы группы халькопирита и пентландит, последний часто вдоль трещин отдельности. Размер агрегатов хиббингита не превышает 0,7×0,2 мм, размер индивидуальных кристаллов уплощенной формы обычно от 5–10 до 40 мкм. Состав хиббингита заметно варьирует по соотношению изоморфных Fe и Mn, содержание минала кемпита колеблется от 2 до 38 мол.% (табл. 5, ан. 38–45). Особенность этого хиббингита — наличие примесей Cu, Zn, Ni и Co, изоморфно замещающих Fe, а также S, изоморфно замещающей хлор. Наличие меди неудивительно, поскольку с минералами ряда хиббингит—кемпит

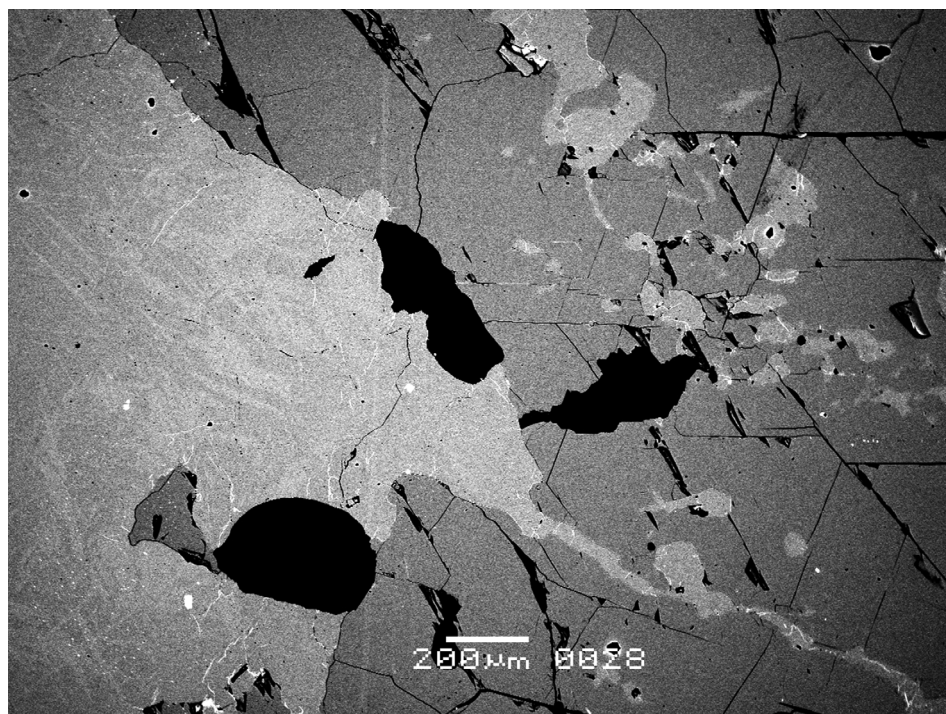


Рис. 3. Тектонизированные магнетит—пентландит—моихукит—пудоранитовые руды с метасомами и прожилками хиббингита (черное). В отраженных электронах

Таблица 4

Химический состав (масс.%) кюстелита (25–34) и золотосодержащего серебра (35–37) из пудоранитовых руд рудного тела Северное 4 на северо-восточном фланге Октябрьского месторождения Норильского рудного поля

| Номер по порядку | Au | Ag | Сумма | Пробность, % |
|------------------|-------|-------|--------|--------------|
| 25 | 19,66 | 79,22 | 98,88 | 199 |
| 26 | 19,65 | 79,66 | 99,31 | 198 |
| 27 | 18,68 | 80,97 | 99,65 | 187 |
| 28 | 18,11 | 82,43 | 100,54 | 180 |
| 29 | 13,50 | 87,94 | 101,44 | 133 |
| 30 | 13,33 | 86,49 | 99,82 | 134 |
| 31 | 12,82 | 86,64 | 99,46 | 129 |
| 32 | 12,28 | 87,45 | 99,73 | 123 |
| 33 | 12,12 | 85,91 | 98,03 | 124 |
| 34 | 10,97 | 87,90 | 98,87 | 111 |
| 35 | 9,56 | 89,23 | 98,79 | 97 |
| 36 | 6,98 | 92,39 | 99,37 | 70 |
| 37 | 4,25 | 94,00 | 98,25 | 43 |
| Средний состав | 12,89 | 86,46 | 99,35 | 130 |

Примечание. Pt, Pd, Cu, Hg не обнаружены.

изоструктурен атакамит $\text{Cu}^{2+}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$. Содержание меди и никеля изменчиво незакономерно; цинком несколько обогащен хиббингит, бедный марганцем. Реакция замещения магнетита хиббингитом (реакция восстановления) прошла, вероятно, в кислой среде, возможно, при участии углеводородов и/или водорода: $2\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4 + 3\text{HCl} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2 \rightarrow 3\text{Fe}^{2+}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$.

Таблица 6

Химический состав (масс.%) сидерита (46–51) из метаморфизованных сульфидных руд рудного тела Северное 4 на северо-восточном фланге Октябрьского месторождения Норильского рудного поля

| Компоненты | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| FeO | 64,38 | 61,26 | 61,16 | 61,20 | 57,36 | 42,80 |
| MnO | 0,24 | 0,30 | 0,37 | 0,49 | 1,33 | 13,70 |
| MgO | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо |
| CaO | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 0,09 |
| CoO | 0,19 | 0,26 | 0,32 | 0,19 | 0,32 | 0,26 |
| CuO | 0,14 | 0,14 | 0,13 | нпо | 2,23 | 4,74 |
| NiO | нпо | нпо | нпо | нпо | 0,26 | 0,19 |
| ZnO | нпо | нпо | нпо | нпо | 0,21 | нпо |
| Сумма | 61,95 | 61,96 | 61,98 | 61,88 | 61,71 | 61,78 |
| Число атомов в формуле | | | | | | |
| Fe | 0,991 | 0,989 | 0,987 | 0,988 | 0,934 | 0,697 |
| Mn | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,022 | 0,226 |
| Ca | – | – | – | – | – | 0,002 |
| Co | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,003 | 0,005 | 0,004 |
| Cu | 0,002 | 0,002 | 0,002 | – | 0,032 | 0,068 |
| Ni | – | – | – | – | 0,004 | 0,003 |
| Zn | – | – | – | – | 0,003 | – |
| Сумма | 1 | | | | | |
| CO ₃ | 1 | | | | | |

Примечание. Pb, Cd не обнаружены.

Сидерит и марганцовистый сидерит. Во многих псевдоморфозах по магнетиту агрегаты хиббингита окружает сидерит, местами с реликтами магнетита (рис. 5, А). Относительно редко псевдо-

Рис. 4. Псевдоморфозы хиббингита по магнетиту и прилегающим сульфидам Cu-Fe-Ni (А), в отраженном свете при одном никеле; овальные кристаллы и прожилки магнетита в сульфидной матрице, вокруг магнетита каймы замещения хиббингита (темно-серое, ан. 38, 39) и марганцовистого хиббингита (черно-серое, ан. 44, 45) с включениями звягинцевита (белое) (Б); частичная псевдоморфоза хиббингита (черное, ан. 40) по брекчированному магнетиту, белое — звягинцевит (В); реликты магнетита (ан. 8) среди хиббингита (черное, ан. 41), в хиббингите сингнетичные включения звягинцевита (белое, ан. 57) (Г); Б, В, Г — в отраженных электронах

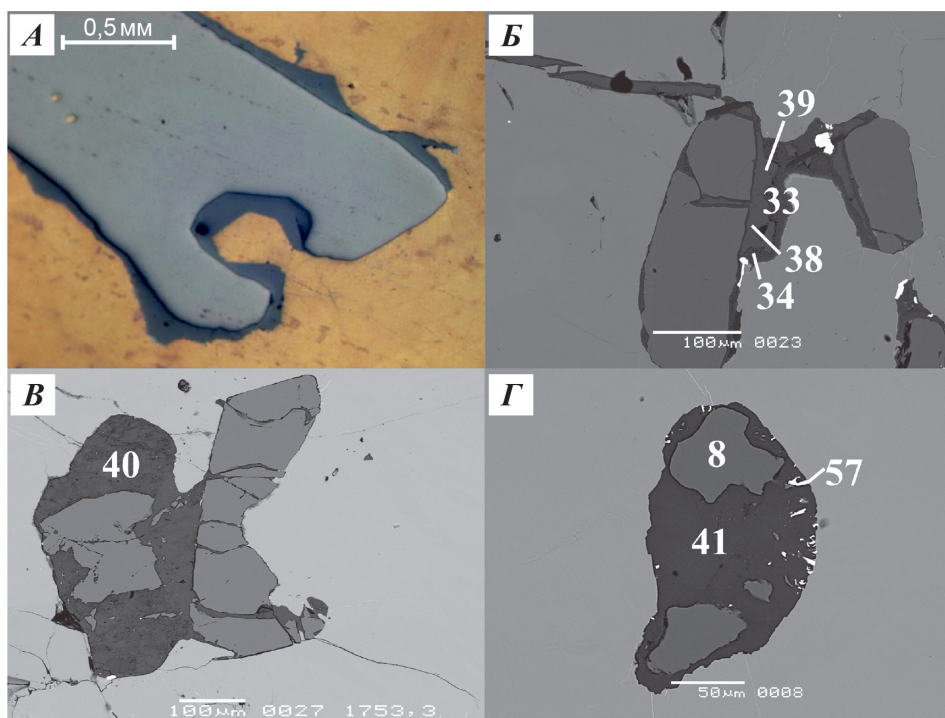
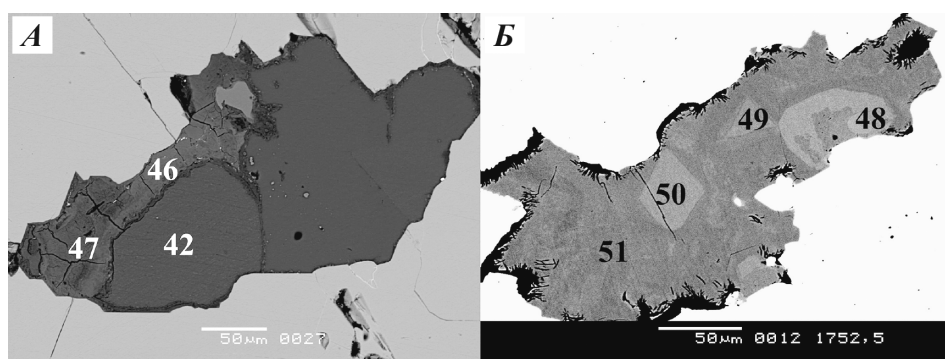


Рис. 5. Псевдоморфоза хиббингита (темно-серое, ан. 42) и сидерита (ан. 46, 47) по магнетиту, в сульфидной матрице (А); псевдоморфоза сидерита по магнетиту, в ядрах кристаллов — более светлый сидерит (ан. 48, 49, 50), во внешних зонах — более темный марганцовистый сидерит (ан. 51), вдоль контактов с сульфидной матрицей вроски пластин позднего гизингерита (черное) (Б); А, Б — в отраженных электронах



морфозы по магнетиту и по сульфидам Cu-Fe-Ni целиком слагает сидерит. Иногда это сростания зональных и сложнзональных кристаллов сидерита, в которых ядра бедного марганцем сидерита окружены марганцовистым сидеритом (рис. 5, Б). Размер ромбоэдрических и сложной формы кристаллов сидерита обычно <70 мкм. Большая часть сидерита бедна марганцем (табл. 6, ан. 46–50). Обогащенный марганцем сидерит содержит до 4 масс.% Cu (табл. 6, ан. 51).

Реакция замещения магнетита ассоциацией хиббингита и сидерита — реакция восстановления, вероятно, прошла в кислой (углекислой) среде, возможно, при участии водорода: $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4 + \text{HCl} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+}_2(\text{OH})_3\text{Cl} + \text{Fe}^{2+}[\text{CO}_3]$.

Гипогенный фосгенит. Фосгенит — хлорид-карбонат свинца $\text{Pb}_2[\text{Cl}_2/\text{CO}_3]$ — типичный гипергенный минерал зоны окисления сульфидных свинцовых руд [Anthony et al., 2003]. Встретить гипергенный минерал среди невыветрелых руд на глубине >1750 м от поверхности маловероятно. Возможно, это первая находка гипогенного фосгенита. Фосгенит глубоких горизонтов Октябрьского месторождения слагает

псевдоморфозы по галениту в сростании с хиббингитом или с беспримесным звягинцевитом и хиббингитом (рис. 6, А, Б). Размер этих псевдоморфоз небольшой, поскольку таков размер выделений исходного галенита. Изученный стехиометричный по составу фосгенит содержит существенные примеси Cu, Fe и Ni, изоморфно замещающих Pb, и некоторое количество S, изоморфно замещающей Cl (табл. 7, ан. 52–55). Содержание в минерале кислорода, достаточно точно отвечающее его формуле, подтверждено анализом с помощью электронного микрозонда. Реакция замещения галенита фосгенитом, вероятно, прошла в кислой–углекислой среде: $2\text{PbS} + 2\text{HCl} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Pb}_2[\text{Cl}_2/\text{CO}_3] + 2\text{H}_2\text{S}\uparrow$.

Метаморфогенно-гидротермальный беспримесный звягинцевит. Звягинцевит — интерметаллид палладия и свинца $(\text{Pd}, \text{Pt}, \text{Au})_3(\text{Pb}, \text{Sn})$, в котором обычно часть Pd замещена Pt и Au, а часть Pb замещена Sn, был открыт в норильских сульфидных рудах И.В. Муравьевой [Генкин и др., 1966]. Кристаллы звягинцевита редки, кубической формы [Gebhard, Schlüter, 1996; Nekrasov et al., 2005]. По составу существует непрерывный ряд от звягинцевита

Таблица 7

Химический состав (масс.%) фосгенита (52–55)
из метаморфизованных сульфидных руд рудного тела
Северное 4 на северо-восточном фланге Октябрьского
месторождения Норильского рудного поля

| Компоненты | 52 | 53 | 54 | 55 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Pb | 66,67 | 61,02 | 56,65 | 56,46 |
| Fe | 3,06 | 4,43 | 3,46 | 3,86 |
| Cu | 1,34 | 4,90 | 7,57 | 6,53 |
| Ni | 1,48 | нпо | 1,26 | 1,68 |
| Co | нпо | нпо | нпо | 0,14 |
| Cl | 14,18 | 15,18 | 16,35 | 16,36 |
| S | 0,61 | 0,87 | 0,46 | 0,61 |
| Сумма | 87,34 | 86,40 | 85,75 | 85,64 |
| Число атомов в формуле | | | | |
| Pb | 1,53 | 1,30 | 1,15 | 1,14 |
| Fe | 0,26 | 0,35 | 0,26 | 0,29 |
| Cu | 0,10 | 0,34 | 0,50 | 0,43 |
| Ni | 0,12 | – | 0,09 | 0,12 |
| Co | – | – | – | 0,01 |
| Сумма | 2,01 | 1,99 | 2,00 | 1,99 |
| Cl | 1,90 | 1,89 | 1,94 | 1,93 |
| S | 0,09 | 0,12 | 0,06 | 0,08 |
| CO ₃ | 1 | | | |

Примечание. Zn, Br, Se — не обнаружены.

до атокита (Pd,Pt)₃Sn, содержание платины в звягинцевите до 13 масс.% и более, олова — до 8 масс.% [Laflamme, 1976; Дистлер и др., 1999; Oberthür et al., 2003; Nekrasov et al., 2005; Спиридонов, 2010, 2020б, 2021б; Мочалов, Якубович, 2018]. Установлено, что Pb в звягинцевите изоморфно замещают также Bi, Te, Sb, Hg, Cd, Ge [Szyman'ski et al., 1997; Junge et al., 2014; Спиридонов и др., 2015, 2019а, б]. Такой же звягинцевит описан выше в рассматриваемых рудах. Подавляющая часть звягинцевита в норильских и йоко-довыренских сульфидных Co–Cu–Ni рудах — послемагматическое пневматолитовое образование [Спиридонов, 2010; Спиридонов и др., 2015, 2019а,б, 2020б].

В метаморфизованных сульфидных рудах глубоких горизонтов северо-восточного фланга Октябрьского месторождения развит иной тип

звягинцевита — метаморфогенно-гидротермальный беспримесный звягинцевит в гнездах хиббингита и сидерита (рис. 4, В, Г; 7; 8, А). Размер выделений такого звягинцевита обычно <40 мкм. Границы между звягинцевитом и хиббингитом — индукционные поверхности совместного роста. По этой причине форма выделений звягинцевита, как правило, неправильная, нередко уплощенная. Редкие кубические кристаллы звягинцевита включены в сидерит (рис. 8, А). Выделения звягинцевита обычно тяготеют к контакту сульфидной матрицы и гнезд хиббингита, при этом звягинцевит нередко растет перпендикулярно подложке (рис. 4, Г). Беспримесный звягинцевит активно замещает пневматолитовый полярит (рис. 2, Г). Вероятно, за счет вещества пневматолитового полярита и возникла большая часть описанного метаморфогенно-гидротермального беспримесного звягинцевита. Состав этого звягинценита близок к Pd₃Pb, вариации состава от Pd_{3,01}Pb_{0,99} до Pd_{2,99}Pb_{1,01} (табл. 8, ан. 56–62). Единственный элемент-примесь — кадмий, это характерный элемент метаморфогенно-гидротермальных образований [Спиридонов, Гриценко, 2009], установлен в единичных анализах звягинцевита в количестве <0,5 масс.%.

Таблица 8

Химический состав (масс.%) метаморфогенно-гидротермального звягинцевита (56–62)
из метаморфизованных сульфидных руд рудного тела
Северное 4 на северо-восточном фланге Октябрьского
месторождения Норильского рудного поля

| Компо- ненты | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 |
|---|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Pd | 60,92 | 60,30 | 60,18 | 61,13 | 59,72 | 60,27 | 59,14 |
| Pb | 38,97 | 38,78 | 38,88 | 38,74 | 38,04 | 39,30 | 38,56 |
| Cd | нпо | нпо | нпо | 0,45 | 0,43 | нпо | нпо |
| Сумма | 99,89 | 99,08 | 99,06 | 100,32 | 98,19 | 99,57 | 97,70 |
| Число атомов в формуле в расчете на 4 атома | | | | | | | |
| Pd | 3,011 | 3,007 | 3,003 | 3,002 | 2,999 | 2,996 | 2,991 |
| Pb | 0,989 | 0,993 | 0,997 | 0,977 | 0,981 | 1,004 | 1,009 |
| Cd | – | – | – | 0,021 | 0,020 | – | – |
| Pb + Cd | 0,989 | 0,993 | 0,997 | 0,998 | 1,001 | 1,004 | 1,009 |

Примечание. Pt, Ru, Os, Ir, Au, Ag, Cu, Sn,As, Sb, Bi, Te не обнаружены.

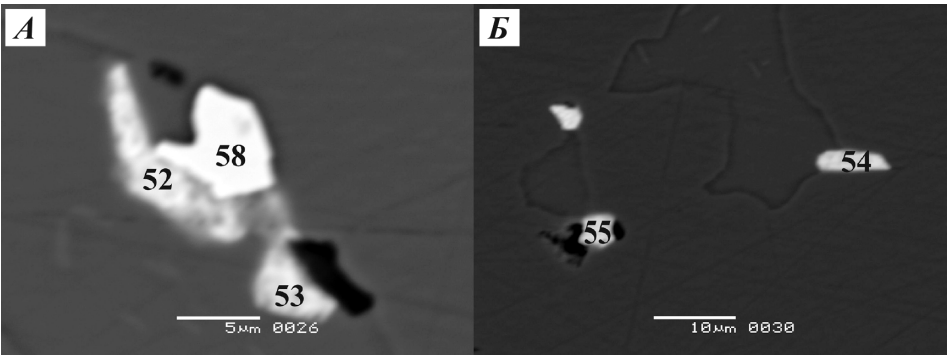
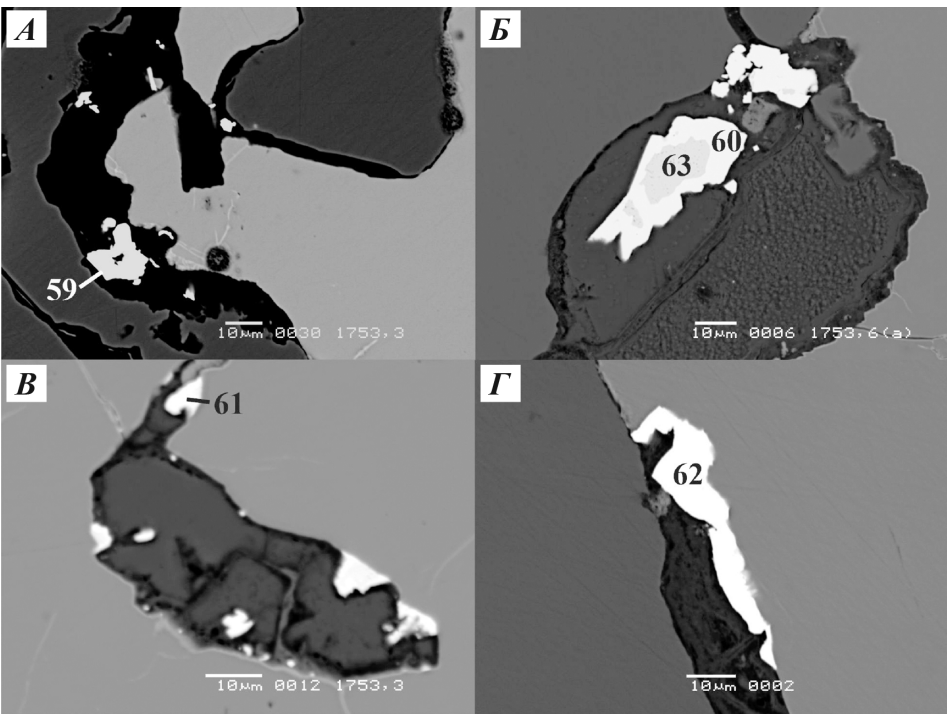


Рис. 6. Полиминеральная псевдоморфоза по галениту — фосгенит (ан. 52, 53), звягинцевит (белое, ан. 58) и хиббингит (черное), в матрице сульфидов Cu–Fe–Ni (А); псевдоморфозы фосгенита (светлые, ан. 54, 55) и хиббингита (черное) по галениту, в матрице сульфидов Cu–Fe–Ni (Б); А, Б — в отраженных электронах

Рис. 7. Звягинцевит (белое, ан. 59) в агрегате хиббингита (черное) в матрице сульфидов (светло-серое) (А); звягинцевит (белое, ан. 60) с включениями серебра (ан. 63) в агрегате хиббингита; слева — магнетит, справа — сульфидная матрица (Б); звягинцевит (белое, ан. 61) в псевдоморфозах хиббингита (темно-серое) и сидерита (черное) по магнетиту в сульфидной матрице (В); звягинцевит (белое, ан. 62) и хиббингит (черное) на контакте магнетита и сульфидной матрицы(Г); А, Б, В, Г — в отраженных электронах



Метаморфогенно-гидротермальное беспримесное серебро. Почти все выделения беспримесного звягинцевита среди хиббингита и сидерита содержат включения беспримесного серебра (рис. 7, Б; 8, А) или звягинцевит окружает выделения такого серебра (рис. 8, Б). Беспримесное серебро слагает метасомы и микропрожилки, обычно совместно со сфалеритом в брекчированных агрегатах пудоранита (рис. 8, В, Г). В составе этого серебра Au, Cu, Hg, Sb, Bi, Pd не обнаружены. Химический состав минерала (масс.%): ан. 63 — Ag 100,82; ан. 64 — Ag 100,64; ан. 65 — Ag 99,77; ан. 66 — Ag 99,60; ан. 67 — Ag 99,18; ан. 68 — Ag 98,70; ан. 69 — Ag 98,68%.

Метаморфогенно-гидротермальный Cd-сфалерит. Сфалерит в виде небольших (<60 мкм) скелетных кристаллов развит у контактов гнезд хиббингита и окружающей сульфидной матрицы и слагает в ней обособленные метасоматические вроски и прожилки, нередко совместно с беспримесным серебром (рис. 8, В, Г). Характерная особенность сфалерита — повышенное содержание кадмия (1,7–2,2 масс.% Cd), а также Cu, наличие малых примесей Ge, Ni и Co (табл. 9, ан. 70–76). Кадмием относительно обогащен наиболее железистый метаморфогенно-гидротермальный сфалерит, тогда как для обычного сфалерита гидротермального генезиса характерно накопление кадмия в наименее железистых разновидностях.

Более поздняя метаморфогенно-гидротермальная минерализация. Описанные выше образования местами несколько брекчированы и в них развиты более поздние метаморфогенно-гидротермальные гизингерит ($\text{Fe}_{3.81}^{3+}\text{Mg}_{0.12}\text{Fe}_{0.07}^{2+}[(\text{OH}_{7.89}\text{Cl}_{0.11})_8/(\text{Si}_{3.81}\text{Fe}_{0.19}^{3+})_4\text{O}_{10}]\cdot 4(\text{H}_2\text{O})$), борнит ($\text{Cu}_{4.96}\text{Ag}_{0.02/4.98}\text{Fe}_{1.03}\text{S}_{3.99}$ и барит ($\text{Ba}_{0.984}\text{Sr}_{0.016}[\text{SO}_4]$) (рис. 5, Б; 9, А, Б). Местами руды пронизаны волосовидными кри-

Таблица 9
Химический состав (масс.%) сфалерита (70–76) из метаморфизованных сульфидных руд рудного тела Северное 4 на северо-восточном фланге Октябрьского месторождения Норильского рудного поля

| Компо- ненты | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 |
|------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Zn | 56,85 | 57,98 | 56,80 | 57,01 | 57,58 | 56,81 | 60,92 |
| Fe | 6,72 | 6,33 | 6,15 | 6,10 | 6,02 | 5,91 | 2,86 |
| Cd | 2,17 | 2,04 | 2,06 | 1,95 | 1,84 | 1,75 | 1,69 |
| Cu | 0,70 | 1,16 | 0,84 | 0,90 | 1,19 | 2,06 | 0,92 |
| Ni | нпо | 0,17 | 0,23 | 0,11 | 0,14 | 0,25 | 0,11 |
| Co | нпо | нпо | 0,11 | 0,12 | нпо | нпо | нпо |
| Ge | нпо | нпо | 0,43 | 0,44 | нпо | нпо | 0,36 |
| S | 32,72 | 33,27 | 32,71 | 32,65 | 32,91 | 32,89 | 32,72 |
| Сумма | 99,16 | 100,95 | 99,33 | 99,28 | 99,68 | 99,67 | 99,58 |
| Число атомов в формуле | | | | | | | |
| Zn | 0,852 | 0,854 | 0,851 | 0,854 | 0,858 | 0,847 | 0,914 |
| Fe | 0,118 | 0,109 | 0,108 | 0,107 | 0,105 | 0,103 | 0,050 |
| Cd | 0,019 | 0,017 | 0,018 | 0,017 | 0,016 | 0,015 | 0,015 |
| Cu | 0,011 | 0,018 | 0,013 | 0,014 | 0,018 | 0,032 | 0,014 |
| Ni | – | 0,003 | 0,004 | 0,002 | 0,002 | 0,004 | 0,002 |
| Co | – | – | 0,002 | 0,002 | – | – | – |
| Ge | – | – | 0,006 | 0,006 | – | – | 0,005 |
| Сумма | 1,000 | 1,001 | 1,002 | 1,002 | 0,999 | 1,001 | 1,000 |
| S | 1,000 | 0,999 | 0,998 | 0,998 | 1,001 | 0,999 | 1,000 |

Примечание. Mn, Hg, Ga, Sn, Se не обнаружены.

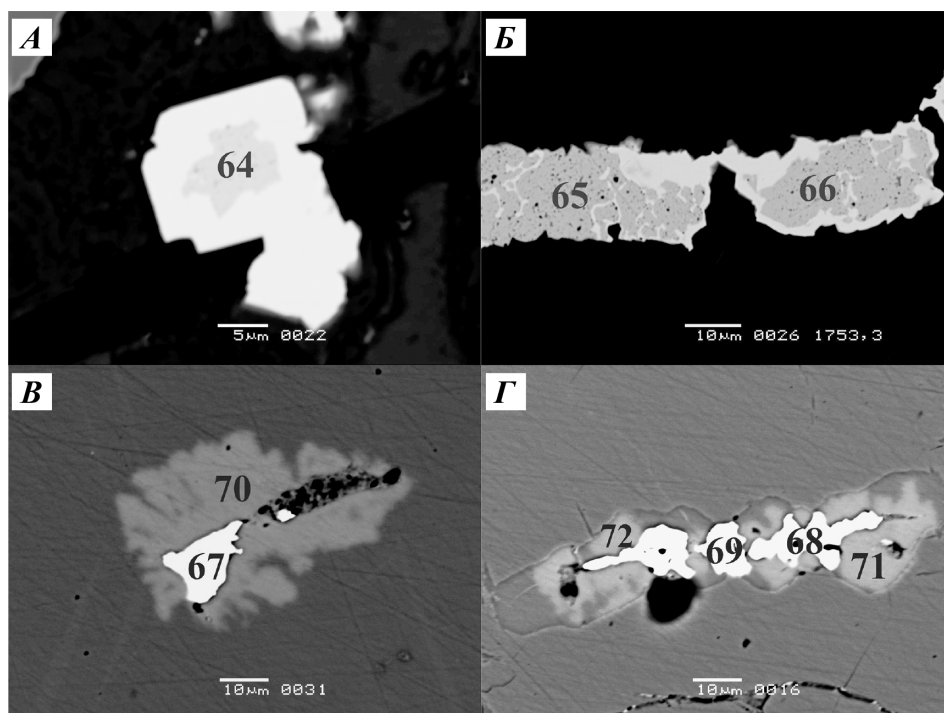


Рис. 8. Кубический кристалл звягинцевита (белое) с включением серебра (ан. 64) в матрице сидерита (А); срастание серебра (серое, ан. 65, 66) и звягинцевита (светлое), на серебре черные точки — акантит, возникший за счет поглощения серы из воздуха после изготовления шлифа (Б); скелетный сфалерит (ан. 70) и серебро (белое, ан. 67) в матрице путоранита (Б); прожилок сфалерита (ан. 71, 72) и серебра (белое, ан. 68, 69) в матрице путоранита (Г); А, Б, В, Г — в отраженных электронах

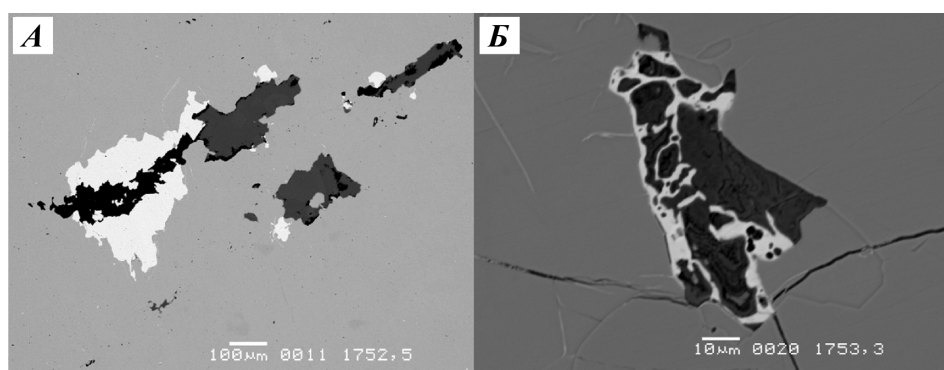


Рис. 9. Поздние борнит (белое) и гизингерит (черное) замещают хиббингит (темно-серое) и матрицу путоранита (А); поздний барит (светло-серое) замещает брекчированный хиббингит (черно-серое). В матрице путоранита тонкие просечки гизингерита (черное) (Б); А, Б — в отраженных электронах

волиейными прожилками борнита. Минеральная ассоциация с гизингеритом возникла при повышенной фугитивности O_2 .

Заключение. На глубоких горизонтах (>1750 м) северо-восточного фланга Октябрьского месторождения Норильского рудного поля рудное тело Северное 4 слагают уникальные магматогенные руды. Это агрегаты путоранита $[(Fe_{17.6-17.9}Ni_{0.4-1.1}Co_{0-0.1})_{18-19}Cu_{15.8-17.0}]_{35}S_{32}$ с решеткой ламелл распада моихукита $[(Fe_{17.8-18.0}Ni_{0.2-0.3}Co_{0-0.1})_{18.2-18.3}Cu_{17.7-17.8}]_{36}S_{32}$, пентландита $(Ni_{4.41}Fe_{4.36}Co_{0.23})_9S_8$, подчиненных марганецсодержащего магнетита и галенита. Руды содержат пневматолитовые станнопалладинит Pd_5CuSn_2 , полярит $Pd(Bi,Pb)$, плюмбополярит $Pd(Pb,Bi)$, тетраферроплатину $Pt_2Fe(Fe,Cu,Ni)$, туламинит $Pt_2Fe(Cu,Fe,Ni)$ и кюстелит (Ag,Au) . В тектонизированных и метаморфизованных рудах развиты обильный борнит и магнетит. Послеборнитовые образования представлены агрегатами хиббингита и марганцовистого хиббингита $(Fe^{2+},Mn^{2+})_2(OH)_3Cl$, сидерита и марганцовистого сидерита $(Fe^{2+},Mn^{2+})[CO_3]$, замесившими магнетит и сульфиды $Cu-Fe-Ni$. Беспримесные звягинцевит Pd_3Pb и серебро слагают

сингенетичные включения в агрегатах хиббингита и сидерита. Беспримесный звягинцевит замещает и пневматолитовый полярит, за счет вещества которого, вероятно, и возник. Этот звягинцевит резко отличен от пневматолитового звягинцевита отсутствием в его составе Pt, Sn, Bi, Sb, Hg . Впервые обнаруженный гипогенный фосгенит $Pb_2[Cl_2/CO_3]$ слагает псевдоморфозы по галениту, иногда в срастании с хиббингитом.

Описанная новая в норильских рудах минеральная низкотемпературная метаморфогенно-гидротермальная ассоциация возникла при участии углекисло-хлоридных растворов в восстановительных условиях. Более поздние гизингерит, борнит, барит, замещающие хиббингит и сидерит, возникли при повышенной фугитивности O_2 .

Благодарности. Авторы благодарны Т.Л. Евстигнеевой за ряд существенных критических замечаний.

Финансирование. Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будько И.А., Изоитко В.М., Кулагов Э.А., Митенков Г.А. Макинавит и валлериит в рудах Норильска и Талнаха // Уч. Зап. НИИГА. Рег. Сер. 1966. Вып. 5. С. 203–209.
- Генкин А.Д., Дистлер В.В., Филимонова А.А. и др. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 234 с.
- Генкин А.Д., Муравьева И.В., Тронева Н.В. Звягинцевит, природное интерметаллическое соединение палладия, платины, свинца и олова // Геология рудных месторождений. 1966. Т. 8, № 1. С. 94–99.
- Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 89 с.
- Годлевский М.Н., Шумская Н.И. Халькопирит-миллеритовые руды месторождения Норильск I // Геология рудных месторождений. 1960. Т. 2, № 6. С. 61–72.
- Горяинов И.Н., Аглонов В.С. Региональная гидротермальная деятельность на северо-западе Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1980. Т. 21, № 7. С. 35–43.
- Дистлер В.В., Служеникин С.Ф., Кабри Л.Дж. и др. Платиновые руды Норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидного концентрирования благородных металлов // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41, № 3. С. 241–265.
- Золотухин В.В. О низкотемпературных метасоматитах, связанных с процессами серпентинизации в норильских рудоносных трапповых интрузиях // Геология и петрология интрузивных траппов Сибирской платформы. М.: Наука, 1970. С. 179–186.
- Золотухин В.В., Васильев Ю.Р., Смекалин А.Г., Бакуменко И.Т. Бабингтонит-пренит-пумпеллиитовая парагенетическая ассоциация в метасоматитах Норильска // Мат-лы по генетической и экспериментальной минералогии. Т. 5. Новосибирск: Наука, 1967. С. 218–251.
- Изоитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 582 с.
- Кулагов Э.А., Евстигнеева Т.Л., Юшко-Захарова О.Е. Новый сульфид никеля — годлевскит // Геология рудных месторождений. 1969. Т. 11, № 3. С. 115–121.
- Люлько В.А., Амосов Ю.Н., Душаткин А.Б. Тектоника, рудоконтролирующие структуры и металлогеническое районирование Игарско-Норильского региона. Металлогения Сибири. Т. 2. Новосибирск: Наука, 1987. С. 143–149.
- Маслов Г.Д. Тектоника Игарско-Норильского района и рудоконтролирующие структуры // Тектоника Сибири. Т. 2. Новосибирск: Наука, 1963. С. 336–350.
- Мочалов А.Г., Якубович О.В. Звягинцевит (Pd, Pt)₃Pb как новый ¹⁹⁰Pt–⁴He геохронометр // Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 220–222.
- Рябов В.В. Некоторые особенности минералогии метасоматитов из ореола Талнахской дифференцированной рудоносной интрузии (северо-запад Сибирской платформы) // Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Т. 8. Новосибирск: Наука, 1975. С. 107–147.
- Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 10. С. 52–79.
- Спиридонов Э.М. Голотип высококита — метаморфогенно-гидротермальный высококит (Pd,Ni)S месторождения Норильск I // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021а. № 2. С. 79–86.
- Спиридонов Э.М. Новый метаморфогенно-гидротермальный генетический тип звягинцевита Pd₃Pb // Докл. РАН. 2021б. Т. 498, № 1. С. 66–68.
- Спиридонов Э.М., Беляков С.Н., Иванова Ю.А. и др. Платинистый высококит с обратной зональностью и скелетный куперит из метаморфизованных сульфидных руд восточного фланга Октябрьского месторождения, Норильское рудное поле // Зап. РМО. 2020а. Ч. 149, вып. 6. С. 20–31.
- Спиридонов Э.М., Беляков С.Н., Коротаева Н.Н. и др. Меньшиковит Pd₃Ni₂As₃ и ассоциирующие минералы сульфидных руд восточного фланга Октябрьского месторождения, Норильское рудное поле // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020б. № 4. С. 22–29.
- 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. 1–10.
- Спиридонов Э.М., Гриценко Ю.Д. Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. М.: Научный мир, 2009. 218 с.
- Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А. и др. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag и Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 5. С. 447–476.
- Спиридонов Э.М., Ладыгин В.М., Анастасенко Г.Ф. и др. Метавулканиты пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 212 с.
- Спиридонов Э.М., Орсов Д.А., Арискин А.А. и др. Hg- и Cd-содержащие минералы Pd, Pt, Au, Ag сульфидноносных базитов и гипербазитов Йоко-Довыренского интрузива в байкалидах Северного Прибайкалья // Геохимия. 2019а. Т. 64, № 1. С. 43–58.
- Спиридонов Э.М., Орсов Д.А., Арискин А.А. и др. Германийсодержащие минералы Pd — палладогерманид Pd₂Ge, Ge-паоловит Pd₂(Sn,Ge), звягинцевит сульфидноносных анортозитов Йоко-Довыренского интрузива, Прибайкалье // Геохимия. 2019б. Т. 64, № 5. С. 554–558.
- Степанов В.К., Туровцев Д.М. Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Тр. ЦНИГРИ. 1988. Вып. 223. С. 86–94.
- Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л. Путранит и никелистый путранит — новые минералы из группы халькопирита // Зап. ВМО. 1980. Ч. 109. Вып. 3. С. 335–341.
- Филимонова А.А., Муравьева И.В., Евстигнеева Т.Л. Минералы группы халькопирита медно-никелевых руд Норильских месторождений // Геология рудных месторождений. 1974. Т. 16, № 5. С. 36–45.
- Anthony J.W., Bideaux R.A., Bladh K.W., Nichols M.C. Handbook of Mineralogy. Vol. V. Borates, Carbonates, Sulfates. Mineral Data Publishing, Tucson: AZ, 2003. 813 p.
- Buchwald V.F., Koch C.B. Hibbingite (Fe₂(OH)₃Cl), a chlorine-rich corrosion product in meteorites and ancient iron objects // Meteoritics. 1995. Vol. 30. P. 493.
- Gebhard G., Schlüter J. Zvyagintsevite aus Siberian // Lapis. 1996. Bd. 21, N 10. S. 47.
- Junge M., Oberthür T., Melcher F. Cryptic variation of chromite chemistry, platinum group element and platinum group mineral distribution in the UG-2 chromitite: an example from the Karee Mine, Western Bushveld Complex, South Africa // Econ. Geol. 2014. Vol. 109. P. 795–810.

Laflamme J.H.G. Zvyagintsevite from Stillwater. CAN-MET. 1976. Inter. Rep.

Nekrasov I.Y., Lennikov A.M., Zalishchak B.L. et al. Compositional variations in platinum-group minerals and gold, Konder alkaline-ultrabasic massif, Aldan Shield, Russia // *Canad. Mineral.* 2005. Vol. 43. P. 637–654.

Oberthür T., Weiser T.W., Gast L., Kojonen K. Geochemistry and mineralogy of platinum-group elements at Hartley platinum mine, Zimbabwe. 1. Primary distribution patterns in pristine ores of the Main Sulfide Zone of the Great Dyke // *Mineral. Deposita.* 2003. Vol. 38. P. 327–343.

Philpotts A.R., Ague J.J. Principles of igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press, 2009. 667 p.

Saini-Eidukat B., Kucha H., Keppler H. Hibbingite, $\gamma\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$, a new mineral from the Duluth Complex,

Minnesota, with implications for the oxidation of Fe-bearing compounds and the transport of metals // *Amer. Mineral.* 1994. Vol. 79. P. 555–561.

Saini-Eidukat B., Rudashevsky N.S., Polozov A.G. Evidence for hibbingite — kempite solid solution // *Mineral. Mag.* 1998. Vol. 62. P. 251–255.

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

Szyman'ski J.T., Cabri L.J., Laflamme J.H.G. The crystal structure and calculated powder-diffraction data for zvyagintsevite, Pd_3Pb // *Canad. Mineral.* 1997. Vol. 35. P. 773–776.

Статья поступила в редакцию 19.10.2021,
одобрена после рецензирования 26.10.2021,
принята к публикации 31.05.2021