

УДК 549.514.8-9:551.22(477.75)

Э.М. Спиридонов¹

ГОЛОТИП ВЫСОЦКИТА — МЕТАМОРФОГЕННО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ ВЫСОЦКИТ (Pd,Ni)S ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НОРИЛЬСК-I

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-I, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-I, Leninskiye Gory, 1

Высоцкит развит в Co-Ni-Cu сульфидных сплошных и вкрапленных («миндалекаменных») рудах месторождения Норильск-I, захваченных посттрапповым низкоградным метаморфизмом в условиях пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой (ломонитовой) фаций, в ассоциации с железистым хлоритом, бабингтонитом, ильваитом, гриналитом, миллеритом NiS, куммингтонитом, грюнеритом, пренитом, пумпеллиитом, корренситом, полидимитом Ni₃S₄, галенитом и халькопиритом, кварцем. Это фация метаморфизованных сульфидных руд, которые возникли при невысоком потенциале кислорода и относительно повышенной фугитивности сульфидной серы. Высоцкит здесь крайне беден платиной, обогащен никелем и отчасти железом. Его средний состав (масс.%, $n=17$: Pd 65,65; Pt 0,12; Rh следы; Ni 8,25; Fe 0,95; Cu 0,32; Co 0,03; S 25,03; As 0,03; сумма 100,38; формула этого высоцкита (Pd_{0,79}Ni_{0,18}Fe_{0,02}Cu_{0,01})₁S₁. По минеральным ассоциациям и химическому составу описанный высоцкит соответствует высоцкиту, открытому А.Д. Генкиным и О.Е. Звягинцевым [1962]. Таким образом, голотип высоцкита — метаморфогенно-гидротермальный высоцкит месторождения Норильск-I с составом (Pd,Ni)S.

Ключевые слова: голотип высоцкита, метаморфогенно-гидротермальный высоцкит, месторождение Норильск-I, посттрапповый низкоградный метаморфизм, миннесотаит.

Vysotskite is developed in Co-Ni-Cu sulphide massive and disseminated (“amygdaloid”) ores of the Norilsk-I deposit, entrained by post-trap low-grade metamorphism in the conditions of prehnite-pumpellyite and zeolite (lomontite) facies. Vysotskite associates with ferrian chlorite, cummingtonite, grünerite, prehnite, corrensite, ilvaite, babingtonite, pumpellyite, grinalite, millerite NiS, polydymite Ni₃S₄, galenite and chalcopyrite. This facies of metamorphosed sulphide ores were formed in the conditions of low oxidative potential and relatively high sulphide sulfur fugacity. This vysotskite is extremely poor in platinum, enriched in nickel and partly in iron. The average composition of studied vysotskite is (wt%, $n=17$): Pd 65,65; Pt 0,12; Rh, Au traces; Ni 8,25; Fe 0,95; Cu 0,32; Co 0,03; S 25,03; As 0,03; sum 100,38; the formula of the mineral is (Pd_{0,79}Ni_{0,18}Fe_{0,02}Cu_{0,01})₁S₁. According to mineral associations and chemical composition, the described vysotskite corresponds to vysotskite discovered by A.D. Genkin and O.E. Zvyagintsev [1962]. Therefore, vysotskite holotype is metamorphogenic-hydrothermal vysotskite of the Norilsk-I deposit with (Pd,Ni)S composition.

Key words: vysotskite holotype, metamorphogenic-hydrothermal vysotskite, Norilsk-I deposit, post-trap low-grade metamorphism, minnesotaite.

Введение. Норильское рудное поле — крупнейшее скопление руд палладия. Норильские сульфидные Co-Ni-Cu руды содержат множество минералов Pd. Одно из достижений выдающегося исследователя норильских руд А.Д. Генкина совместно с О.Е. Звягинцевым — открытие высоцкита — моносulfида Pd и Ni [Генкин, Звягинцев, 1962]. Минерал назван в честь знаменитого геолога — исследователя уральских месторождений золота и платины Н.К. Высоцкого, который выявил и промышленную ценность норильских руд — обнаружил в них никель, кобальт и платиновые металлы. А.Д. Генкин установил, что высоцкит в норильских рудах — позднее образование, ассоциирующее с актинолитом; он считал, что высоцкит возник при замещении миллеритом и полидимитом обогащенного палладием пентландита.

В дальнейшем было установлено, что высоцкит — один из промышленных минералов гигантских Pd-Pt месторождений интрузива Бушвельд в Южной Африке [Cabri et al., 1978; Verryn, Merkle, 1987; Merkle et al., 1994; Семиколенных, 2013; Junge et al., 2014], крупных Pd-Pt месторождений интрузивов Стиллкотер [Talkington, Lipin, 1986; Volbort et al., 1986] и Великой Дайки [Oberthür et al., 2003]. Высоцкит здесь ассоциирует с хромшпинелидами, брэггитом и куперитом. Состав высоцкита в рудах этих интрузивов варьирует от (Pd,Ni)S до наиболее распространенного (Pd,Pt,Ni)S; минерал нередко содержит Ir, Rh, Se [Bowles, 2000].

Установлен непрерывный по составу ряд тетрагональных моносulfидов от высоцкита через брэггит до куперита PtS [Cabri et al., 1978; Cridle, Stanley, 1985; Talkington, Lipin, 1986; Verryn,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, профессор; e-mail: ernstspiridon@gmail.com

Merkle, 1987; Merkle et al., 1994; Junge et al., 2014]. Ранее ряд PtS—PdS делили на три равные части: куперит—брэггит—высоцкит. В настоящее время к купериту относят минералы, близкие к PtS; к брэггиту — минералы с составом (Pt,Pd,Ni)S; к высокоциту — минералы с составом (Pd,Pt,Ni)S.

Судя по экспериментальным данным, куперит начинает кристаллизоваться из магматического расплава при температуре <1200 °C, брэггит — <1000 °C, высокоцит — <900 °C [Verryn, Merkle, 2002]. Поэтому кристаллы с ядром из куперита, окруженного брэггитом, и с внешней зоной из высокоцита [Criddle, Stanley, 1985] имеют прямую зональность, которая отвечает кристаллизации при снижении температуры.

Высоцкит с широкими вариациями состава, а также брэггит и куперит обнаружены и в норильских рудах [Годлевский, Шумская, 1960; Генкин, 1968; Лапутина, Генкин, 1975; Генкин и др., 1981; Служеникин и др., 1994; Sluzhenikin, Mokhov, 2015]. В результате многие геологи стали считать, что наличие минералов ряда куперит — брэггит — высокоцит в норильских сульфидных и малосульфидных рудах — признак магматического происхождения этих руд.

Судя по экспериментальным данным, куперит, брэггит и высокоцит формируются также при участии средне- и низкотемпературных (до 150 °C) гидротермальных (метаморфогенно-гидротермальных) растворов [Evstigneeva et al., 1995]. Таковы высокоцит, брэггит и куперит — продукты гидротермального замещения ранее возникших гидротермальных самородных палладия, платины-палладия и платины в гематит-кварцевых жилах телотермальных Au-Pt-Pd месторождений [Berni et al., 2014]. Метаморфогенно-гидротермальные высокоцит, брэггит и куперит — продукты эпигенетического низкоградного метаморфизма магматогенной Pt-Pd минерализации разного типа; здесь высокоцит и брэггит ассоциируют с такими низкотемпературными минералами, как миллерит и актинолит [Moreno et al., 1999; Barkov et al., 2004a, 2004b].

Рассмотрим генезис высокоцита в норильских рудах.

Норильское рудное поле. Норильское рудное поле находится в северо-западном углу дорифейской Восточно-Сибирской платформы, в области краевых дислокаций [Маслов, 1963; Люлько и др., 1987]. Плутоногенные магматические Ag-Au-Pt-Pd-Co-Ni-Cu месторождения сопряжены с интрузивами норильского типа — наиболее поздними производными грандиозной Сибирской трапповой формации, возникшей на рубеже перми и триаса [Годлевский, 1959; Маслов, 1963; Степанов, Туровцев, 1988]. Норильские руды — продукты кристаллизации сульфидных расплавов. Они слагают залежи и жилы (сплошные руды), вкрапленность в интрузивных породах и роговиках рамы интрузи-

вов (вкрапленные руды), в том числе миниотливки в газовых пустотах базальтов трапповой формации («мандельштейновые» руды).

Первичные руды сложены продуктами субсолидусных превращений высокотемпературных сульфидных твердых растворов, это разнообразный пирротин, троилит, кубанит, халькопирит, пентландит, талнахит [Годлевский, 1959; Генкин и др., 1981; Степанов, Туровцев, 1988]. Каждое тело магматических сульфидов — от миниотливок до крупных залежей — окружено ореолами флюидного воздействия с высокотитанистым биотитом, флогопитом, хлорпаргаситом, фторхлорапатитом, джерфшеритом; размеры ореолов коррелируют с размерами тел сульфидов [Степанов, Туровцев, 1988; Спиридонов, 2010, 2019]. Большая часть Pd, Pt, Au и Ag из первичных норильских руд образует в них собственные минералы — интерметаллиды и близкие к ним теллуриды, висмутиды, станныды, антимониды, арсениды; сульфидов благородных металлов среди них нет [Изоитко, 1997; Спиридонов, 2010, 2019]. Эти минералы благородных металлов слагают метасомы и метакристаллы, замещившие первичные сульфиды и окружающие силикаты. Контуры распространения минералов благородных металлов шире контуров сульфидных тел и совпадают с контурами ореолов флюидного воздействия около них; это послемагматические пневматолитовые (флюидно-метасоматические) образования [Спиридонов, 2010, 2019; Spiridonov et al., 2015].

По нашим данным, минеральный состав пород и руд Норильского рудного поля сформирован в два этапа: первый этап сингенетический — синтрапповая магматогенная минерализация с пневматолитовым продолжением (эти образования рассмотрены выше), второй этап — эпигенетический, посттрапповая метаморфогенно-гидротермальная минерализация [Спиридонов и др., 2000; Спиридонов, Гриценко, 2009; Spiridonov et al., 2016]. Ранее образования второго этапа рассматривали как связанные с трапповой формацией [Годлевский, 1959; Степанов, Туровцев, 1988] или как продукты региональной гидротермальной деятельности [Горяинов, Аплонов, 1980].

Участки Восточно-Сибирской платформы, покрытые толщей платобазальтов мощностью до 3–5 км и насыщенные интрузивами габбро-долеритов, испытали посттрапповое погружение. Трапповая формация и подтрапповые толщи были захвачены эпигенетичным метаморфизмом погружения в условиях цеолитовой, затем пренит-пумпеллиитовой и далее цеолитовой фаций. Фации метаморфизма определены по минеральным ассоциациям по аналогии с данными [Philpotts, Ague, 2009]. Rb/Sr возраст процессов метаморфизма варьирует от 232 до 122 млн лет; максимальные параметры метаморфизма — 1,8–2,5 кбар и 310–330 °C; эпигенетические образования моло-

же трапповой формации на 20 млн лет и более [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]; оливин и бронзит магматических пород повсеместно в той или иной степени замещены серпентинами, куммингтонитом, грюнеритом, Са-плагиоклазы — клиноцоизитом, альбитом, гидрогроссуляром, авгит — актинолитом, хлоритом и пумпелиитом, гриналитом; магнезиальные скарны и скарноиды превращены в серпентин-гидрогранатовые породы с везувианом. В магматогенных пентландит-халькопирит-кубанит-пирротиновых рудах вдоль отдельных трещин, зон дробления и милонитизации, в виде отдельных восточков, пятен, гнезд, микро- и макропрожилков, захватывая крупные блоки рудных залежей, развиты пирит, Ni-пирит, графические срастания пирит-магнетит, халькопирит и магнетит (без структур распада), миллерит, валлериит, макинавит, борнит и халькозин, гизингерит, хизлевудит, годлевскит, полидимит, гематит, игольчатый кубанит, сфалерит, вюртцит, галенит, кобальт-, купро- и аргентопентландит, марказит, паркерит, шэндит, гаухекорнит, точилинит, алабандин, гётит, самородные серебро, мышьяк и висмут, сульфоарсениды, арсениды, сульфоантимониды и антимониды Fe, Ni, Co, а также клаусталит, касситерит, станнин, акантит, штроемейерит, ленаит, науманнит, хоулит, уранинит, антимонит, киноварь, ртутистое серебро [Годлевский, Шумская, 1960; Генкин, Звягинцев, 1962; Будько и др., 1966; Золотухин и др., 1967; Кулагов и др., 1967, 1969; Золотухин, 1970; Рябов, 1975; Горяинов, Аплонов, 1980; Генкин и др., 1981; Изоитко, 1997; Спиридонов, Гриценко, 2009; Спиридонов, 2010, 2019; Spiridonov et al., 2015, 2016]. Обычно с ними ассоциируют метаморфогенно-гидротермальные ангидрит, кальцит, доломит, анкерит, сидерит, хлорит, кварц, пренит, гидрогранаты, серпентины, брусит, ксонотлит, сапонит, стильпномелан, пектолит, тоберморит, датолит, апофиллит, ильваит, бабингтонит, халцедон, ломонтит, стильбит, шабазит, окенит, тальк, гидроталькит, барит, таумасит, хибингит, айоваит, антраксолит, нефтяные битумы, парафины в виде вкрапленности, гнезд и жил. Мощность жил варьирует от нескольких миллиметров до 3 м.

При интенсивном преобразовании первичных руд под действием метаморфогенных флюидов с высокой активностью кислорода их сульфиды были почти полностью замещены ангидритом и гематитом (или магнетитом). При интенсивном преобразовании первичных руд под действием метаморфогенных флюидов с высокой активностью сульфидной серы пирротин, троилит, пентландит,

кубанит были почти полностью замещены пиритом и Ni-пиритом до бравоита, а также марказитом. При интенсивном преобразовании первичных руд под действием метаморфогенных флюидов с умеренной активностью кислорода и сульфидной серы пирротин, троилит, халькопирит, пентландит, кубанит были почти полностью замещены валлериитом.

Изотопный состав свинца галенита метаморфогенно-гидротермальных жил, залегающих среди метаморфизованных норильских руд, иной, чем у свинца первичных норильских руд, — это коровый свинец. Модельный свинцово-изотопный возраст магматогенных норильских руд составляет ~240 млн лет, модельный возраст галенита метаморфогенно-гидротермальных жил — 144–110 млн лет [Спиридонов и др., 2010].

На многих участках месторождения Норильск-I первичные руды настолько преобразованы эпигенетическим метаморфизмом, что месторождение рассматривалось как гидротермальное [Роговер, 1951]. В Норильском рудном поле каждый образец магматических горных пород и магматогенных сульфидных руд содержит сеть микропрожилков метаморфогенно-гидротермальных магнетита, макинавита, валлериита, гизингерита, которые возникли при участии вадозных вод, насыщенных воздухом. Поэтому изотопный состав кислорода норильских горных пород отличен от стандартного, а изотопный состав кислорода норильских магматогенных руд «гидротермальный» [Покровский и др., 2002], изотопный состав аргона магматогенных сульфидных руд — воздушный [Адамская и др., 2017], при этом изотопный состав He, Pb, Sr в тех же образцах магматогенных норильских руд — мантийный [Адамская и др., 2017].

Регенерированная вкрапленная метаморфогенно-гидротермальная Pt-Pd-Ag минерализация Норильского рудного поля развита среди метаморфизованных руд, богатых благородными металлами. Масштаб перемещения мобилизованных Ag, Sn, Pd, Pt составляет от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Регенерированные минералы серебра — распространенные самородное серебро, не содержащее золота (<0,01 масс.% Au), и аргентопентландит $\text{AgFe}_5\text{Ni}_3\text{S}_8$, реже твердый раствор халькопирит-ленаит AgFeS_2 , серебрясодержащий борнит, значительно реже ртутистое серебро (до 11 масс.% Hg), акантит Ag_2S , ялпайт Ag_3CuS_2 , штроемейерит AgCuS , аргентопирит AgFe_2S_3 , науманнит Ag_2Se . Регенеративные минералы палладия и платины — паоловит Pd_3Sn , не содержащий сурьму; Ag паоловит $(\text{Pd}, \text{Ag})_2\text{Sn}$; высоцкит $(\text{Pd}, \text{Ni})\text{S}$; куперит PtS ; брэггит $(\text{Pt}, \text{Pd}, \text{Ni})\text{S}$; Pd-брейттрауптит $(\text{Ni}, \text{Pd})\text{Sb}$; Pd-орселит $(\text{Ni}, \text{Pd})_5\text{As}_2$; палладоарсенид Pd_2As ; винсентит Pd_3As ; хараелакит $(\text{Pt}, \text{Cu}, \text{Pb}, \text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$; соболевскит PdBi , не содержащий теллур и сурьму; фрудит PdBi_2 ; малышевит CuBiPdS_3 ; самородные палладий и платина

[Спиридонов, 2010, 2019; Spiridonov et al., 2015, 2016]. Палладийсодержащие интерметаллиды (палловит, фрудит, соболевскит), арсениды (паллодарсенит, винсентит, орселит) и стибниды (брейтгауптит) развиты среди руд, метаморфизованных при повышенной активности кислорода и низкой активности сульфидной серы, а также среди руд, богатых ангидритом и магнетитом, борнитом или халькозином, с хизлевудитом Ni_3S_2 и/или годлевскитом Ni_9S_8 , касситеритом, оловосодержащими гидрогранатами. Самородная платина изредка образует тонкие каймы замещения вокруг кристаллов пневматолитового сперрилит [Евстигнеева и др., 1990]. Палладийсодержащие сульфиды (высоцкит, куперит, хараелахит, малышевит) присутствуют в рудах, метаморфизованных при относительно повышенной активности сульфидной серы, среди руд с халькопиритом, миллеритом NiS и полидимитом Ni_3S_4 . Хараелахит иногда нарастает на высокоцкит, а куперит — на хараелахит. Изредка самородный палладий или куперит слагают каймы нарастания на самородной платине, окружающей сперрилит.

Эти образования возникли при воздействии умеренно- и малосоленых углекисло-хлоридных флюидов с изменчивыми, но в целом повышенными фугитивностью кислорода и щелочностью. Это растворы NaCl-MgCl_2 с соленостью от 15 до 0,4 масс.% эквивалента NaCl (около 2/3 флюидных включений) и растворы $\text{NaCl-CaCl}_2 (\pm \text{NaHCO}_3)$ с соленостью от 23 до 6,5 масс.% экв. NaCl (1/3 включений) с температурой образования от 270 °С, обычно от 250–216 до 140–120 °С, изредка до 90 °С, и давлением от 1,2 до 0,3 кбар [Спиридонов, Гриценко, 2009].

Материалы и методы исследования. Изучена коллекция сплошных и вкрапленных руд месторождения Норильск-I, отобранных в карьере рудника Медвежий Ручей и из подземных выработок рудника Заполярный Э.А. Кулаговым и Э.М. Спиридоновым. Электронные фотографии и химический анализ минералов выполнен 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 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 FeS_2 (S), алтаит PbTe (Pb, Te), синтетические InAs (As) и CdSe (Cd, Se).

Результаты исследований и их обсуждение. Метаморфизованные сульфидные руды с высокоцкитом месторождения Норильск-I. Высоцкит развит среди метаморфизованных пентландит-кубанит-халькопиритовых и пентландит-халькопиритовых руд, а также руд с талнахитом и путоранитом, богатых благородными металлами. В этих рудах наиболее распространены зернистые агрегаты халькопирита

с пластинчатыми ламеллями распада кубанита, с вкраплениями пентландита и магнетита, редких титаномагнетита и ильменита, весьма редких мелких выделений галенита; халькопирит содержит (масс.%) до 0,7 Ni, 0,4 Zn, 0,1 Co; пентландит — 1,2–2,7 Co, в пентландите развиты тончайшие пластинчатые ламелли распада халькопирита.

В процессе низкоградного метаморфизма первичные сульфиды были полностью или частично замещены мелкозернистыми срастаниями миллерита и халькопирита (без структур распада) (рис. 1), с вкраплениями пирита, полидимита, псевдобрукита, пентландита, редкого борнита. Метаморфогенный халькопирит по составу идеально стехиометричен, беспримесный. Миллерит содержит 0,7–3,6 масс.% Fe, до 0,7% Co, до 0,5% Cu, состав минерала отвечает $(\text{Ni}_{0,94-0,99}\text{Fe}_{0,01-0,06}\text{Co}_{0-0,02}\text{Cu}_{0-0,01})_1\text{S}$. Более крупные выделения миллерита беднее железом, чем мелкие. Метаморфогенный пентландит беден кобальтом (содержит в среднем 0,38 масс.% Co) и обогащен никелем — его состав $\text{Ni}_{5,6}\text{Fe}_{3,3}\text{Co}_{0,1}\text{S}_8$. Ассоциация пентландита с миллеритом свидетельствует о том, что они возникли при температуре ниже 250 °С, т.е. в условиях цеолитовой фации метаморфизма. Ассоциация миллерита и полидимита возникла при более высокой активности сульфидной серы, чем ассоциация миллерита и пентландита. Именно в местах появления ассоциации миллерита и полидимита развита вкрапленность высокоцкита. Титанит и псевдобрукит заместили титаномагнетит и ильменит.

В рудах месторождения Норильск-I, метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллиитовой фации, широко развиты пренит, пумпеллиит, бабингтонит, ильваит, железистый хлорит, куммингтонит и грюнерит, заместившие силикаты интрузивных пород и роговиков с вкрапленностью первичных магматических сульфидов. Ниже приведены их типичные составы:

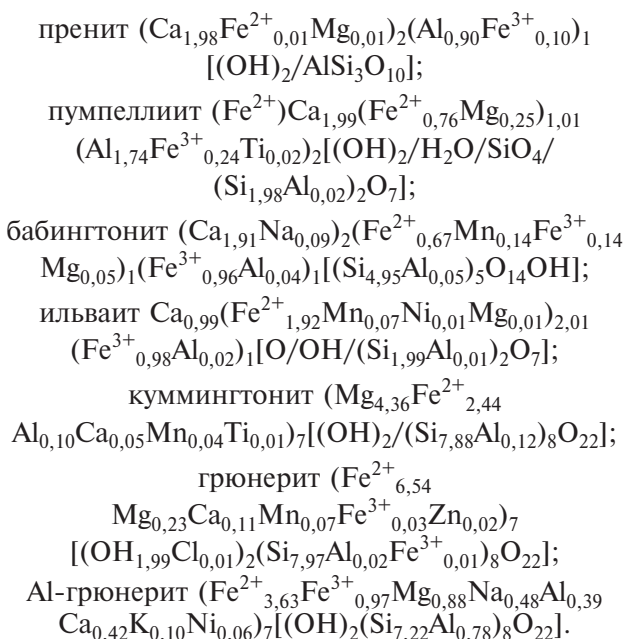
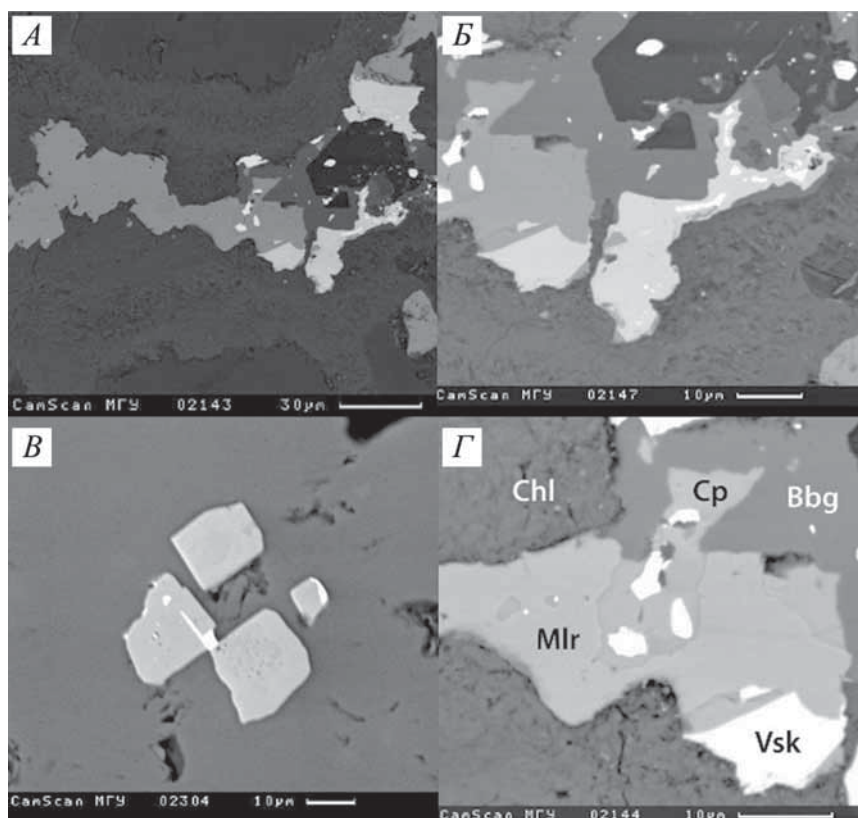
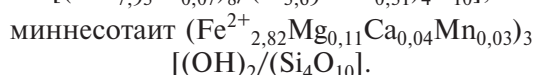
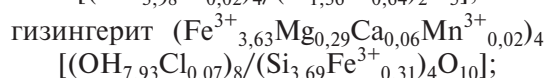
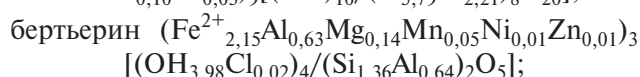
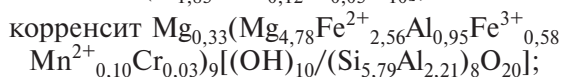
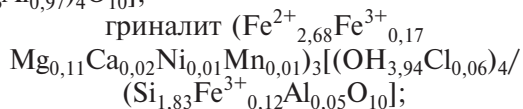


Рис. 1. Месторождение Норильск-I, рудник Медвежий ручей. Метаморфизованные «мандельштейновые» руды: *А* — гнездо — скопление высокоцита (светлый), миллерита и халькопиритом (серые) среди агрегата бабингтонита, ильваита и пумпеллиита (черно-серые), пренита, куммингтонита и кварца (черные); *Б* — срастание высокоцита (светло-серый) и галенита (белый) с миллеритом (серый), бабингтонитом и ильваитом (ровные темно-серые), железистым хлоритом (крупчатый темно-серый), кварцем (черный); *В* — четыре кристалла высокоцита в срастании с галенитом (белый) в агрегате миллерита; *Г* — срастание высокоцита (Vsk), миллерита (Mlr), халькопирита (Cp) в агрегате железистого хлорита (Chl) и бабингтонита (Bdg). В отраженных электронах



Обращает внимание достаточно высокая концентрация трехвалентного железа при преобладании двухвалентного железа. Таким образом, метаморфогенные флюиды имели относительно повышенный окислительный потенциал. Бабингтонит и ильваит обогащены марганцем, что типично для этих минералов. Отметим заметное содержание никеля в метаморфогенных амфиболах и ильваите.

В рудах месторождения Норильск-I, метаморфизованных в условиях цеолитовой фации, широко развиты железистый хлорит — шамозит (брунсвигит по классификации хлоритов М. Хей [1954]), гриналит, корренсит, бертьерин, гизингерит и кварц, меньше — кальцит и миннесотаит (железистый аналог талька), замесившие силикаты интрузивных пород и роговиков с вкрапленностью первичных магматических сульфидов и продукты их метаморфизма в условиях пренит-пумпеллиитовой фации. Ниже даны их типичные составы: Fe-хлорит $(\text{Fe}^{2+}_{4,08}\text{Al}_{0,94}\text{Mg}_{0,90}\text{Mn}_{0,04}\text{Cr}_{0,04})_6[(\text{OH})_8/\text{Si}_{3,03}\text{Al}_{0,97})_4\text{O}_{10}]$;



Обращает внимание резкое различие поздних метаморфогенных силикатов — одни крайне богаты трехвалентным железом, другие — двухвалентным.

Голотип высокоцита. Высоцит слагает редкую вкрапленность в низкоградно-метаморфизованных существенно медистых сульфидных рудах, как массивных, так и вкрапленных. Размер его выделений неправильной формы составляет от нескольких микрометров до 40 мкм (рис. 1, *А*, *Б*, *Г*), изредка — до 260 мкм, крайне редко до 1 мм. Реже встречаются относительно правильной формы мелкие кристаллы с поперечным сечением квадратной или ромбовидной формы, их размер редко превышает 20 мкм (рис. 1, *В*). Высоцит обычно образует срастания с миллеритом (чаще) и халькопиритом, железистым хлоритом, галенитом. В окружении таких срастаний развиты бабингтонит, ильваит, пренит, пумпеллиит, грюнерит, гриналит. Довольно часто высокоцит содержит множество мельчайших включений галенита; возможно, срастания высокоцита и галенита возникли при деструкции звягинцевита Pd_3Pb .

Для всей совокупности анализов высокоцита из месторождения Норильск-I, крайне бедного платиной, отчетливо проявлен изоморфизм палладия и никеля (рис. 2, табл. 1, 2). По составу выделяются не резко различающиеся два типа высокоцита: обогащенный никелем (табл. 1, ан. 1-5 с 10,5–12,5 масс.% Ni) и обедненный никелем (табл. 2, ан. 14-16 с 3–5,5 масс.% Ni). Наиболее распространен высокоцит промежуточного состава (ан. 6-13). Обогащенный никелем высокоцит

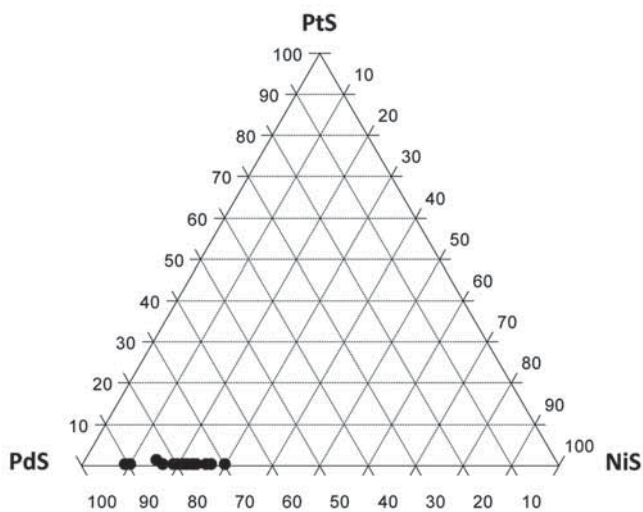


Рис. 2. Вариации состава голотипа высоцкита месторождения Норильск-1

слагает центральные части более крупных его выделений, обедненный никелем высоцкит — внешние участки крупных и мелкие выделения. Содержание железа в высоцките колеблется от 0,5 до 1,6 масс.% и не коррелирует с содержанием никеля. Содержание меди варьирует от следов до 0,8 масс.%; несколько обогащен медью высоцкит с повышенным содержанием никеля. В единичных анализах высоцкита отмечена незначительная примесь родия и золота — до 0,1 масс.%. Сера в высоцките в незначительной степени замещена мышьяком, содержание которого редко достигает 0,1 масс.%.

Таблица 1

Химический состав (масс. %) высоцкита, обогащенного никелем. Метаморфизованные сульфидные Co-Ni-Cu руды месторождения Норильск-1

Компо- ненты	Номер анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Pd	60,35	62,14	62,10	62,52	62,86	64,31	64,47	64,90
Pt	0,11	нпо	нпо	нпо	нпо	0,32	нпо	нпо
Rh	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Au	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Ni	12,49	11,65	11,45	10,45	10,32	9,24	9,36	8,66
Fe	1,38	0,46	0,69	1,08	0,50	1,00	1,04	0,89
Co	0,04	нпо	0,03	0,04	0,08	0,02	нпо	нпо
Cu	0,50	0,61	0,77	0,72	0,65	0,18	0,19	нпо
S	26,03	25,65	25,74	25,45	24,86	25,14	25,08	24,83
As	0,11	0,03	0,11	0,08	0,02	нпо	нпо	0,09
Σ	101,01	100,54	100,89	100,34	99,29	100,21	100,14	99,28
Число атомов в формуле в расчете на два атома								
Pd	0,70	0,73	0,73	0,74	0,76	0,77	0,775	0,79
Pt	—	—	—	—	—	—	—	—
Ni	0,26	0,25	0,24	0,22	0,23	0,20	0,205	0,19
Fe	0,03	0,01	0,015	0,02	0,01	0,025	0,02	0,02
Cu	0,01	0,01	0,015	0,02	0,01	0,005	0,005	—
S	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,995	1,00

Примечания. Нпо — ниже предела обнаружения. Ru, Os, Ir, Ag, Pb, Sn, Sb, Bi, Te — не обнаружены.

Средний состав изученного высоцкита (масс.%, n=17):

Pd 65,65; Pt 0,12; Rh, Au следы; Ni 8,25; Fe 0,95; Cu 0,32; Co 0,03; S 25,03; As 0,03; сумма 100,38;

формула минерала $(Pd_{0,79}Ni_{0,18}Fe_{0,02}Cu_{0,01})S_{1,1}$.

Этот высоцкит стехиометричен — Me:S = 1:1 (9 анализов); Me:S = 0,995:1,005 (4 анализа); Me:S = 1,005:0,995 (3 анализа); Me:S = 1,01:0,99 (1 анализ).

Заключение. По минеральным ассоциациям и химическому составу описанный высоцкит низкоградно метаморфизованных сплошных и «мандельштейновых» сульфидных руд рудников Медвежий Ручей и Заполярный месторождения Норильск-1 соответствует высоцкиту, открытому А.Д. Генкиным и О.Е. Звягинцевым [1962]. Таким образом, голотип высоцкита — это метаморфогенно-гидротермальный высоцкит из месторождения Норильск-1, крайне бедный платиной, с составом (Pd,Ni)S.

Благодарности. Автор благодарен Э.А. Кулагову за помощь в сборе каменного материала для исследования, Н.Н. Коротаевой — за высокое качество микрозондовых анализов.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РФФИ (прект № 19-05-00490), с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таблица 2

Химический состав (масс.%) высоцкита, метаморфизованные сульфидные Co-Ni-Cu руды месторождения Норильск-1

Компо- ненты	Номер анализа							
	9	10	11	12	13	14	15	16
Pd	65,79	66,73	67,60	66,57	68,97	68,66	72,17	72,85
Pt	нпо	0,17	0,06	0,28	0,61	0,11	нпо	нпо
Rh	нпо	нпо	0,04	0,13	нпо	нпо	нпо	нпо
Au	нпо	0,08	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Ni	8,06	7,32	6,58	6,24	6,21	5,63	3,58	2,82
Fe	1,38	1,48	1,60	0,84	0,63	1,30	0,63	0,96
Co	нпо	0,06	нпо	0,03	нпо	0,04	нпо	нпо
Cu	нпо	0,08	0,08	0,05	0,08	0,11	0,12	0,08
S	24,80	24,96	25,17	24,18	24,86	24,69	23,99	24,09
As	нпо	нпо	нпо	0,10	нпо	нпо	нпо	нпо
Σ	99,43	100,88	101,13	98,42	101,36	100,54	100,49	100,80
Число атомов в формуле в расчете на два атома								
Pd	0,80	0,805	0,81	0,835	0,84	0,84	0,905	0,91
Pt	—	—	—	—	0,005	—	—	—
Ni	0,18	0,16	0,145	0,14	0,135	0,13	0,08	0,065
Fe	0,015	0,035	0,04	0,02	0,015	0,03	0,02	0,025
Cu	—	—	—	—	—	—	—	—
S	1,005	1,00	1,005	1,005	1,005	1,00	0,995	1,00

Примечания. Нпо — ниже предела обнаружения. Ru, Os, Ir, Ag, Pb, Sn, Sb, Bi, Te не обнаружены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адамская Е.В., Беляцкий Б.В., Прасолов Э.М. и др. Изотопная геология норильских месторождений. СПб.: ВСЕГЕИ, 2017. 348 с.
- Будько И.А., Изюмко 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., Звягинцев О.Е. Высоцкит, новый сульфид палладия и никеля // Зап. ВМО. 1962. Ч. 91, вып. 6. С. 718–725.
- Генкин А.Д., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л. и др. 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., Шумская Н.И. Халькопирит-миллеритовые руды месторождения Норильск-I // Геология рудных месторождений. 1960. № 6. С. 61–72.
- Горяинов И.Н., Аглонов В.С. Региональная гидротермальная деятельность на северо-западе Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1980. № 7. С. 35–43.
- Евстигнеева Т.Л., Ким А.А., Некрасов И.Я. О деарсенизации сперилита в природе // Минерал. журн. 1990. Т. 12. № 3. С. 90–96.
- 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 парagenетическая ассоциация в метасоматитах Норильска // Мат-лы по генетич. и эксперимент. минералогии. Т. 5. Новосибирск: Наука, 1967. С. 218–251.
- Изюмко 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.
- Кулагов Э.А., Изюмко В.М., Митенков Г.А. Хизлевудит в сульфидных медно-никелевых рудах Талнахского месторождения // Докл. АН СССР. 1967. Т. 176. С. 900–902.
- Лапутина И.П., Генкин А.Д. О минералах ряда брэггит — высокоцит // Изоморфизм в минералах. М.: Наука, 1975. С. 146–150.
- Льюльк 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.
- Покровский Б.Г., Служеникин С.Ф., Кривошук Н.А. Изотопный состав кислорода и водорода в трапповых интрузивах Норильского района // Докл. РАН. 2002. Т. 383. С. 675–679.
- Роговер Г.Б. Месторождение Норильск-I. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 131 с.
- Рябов В.В. Некоторые особенности минералогии метасоматитов из ореола Талнахской дифференцированной рудоносной интрузии (северо-запад Сибирской платформы) // Мат-лы по генетич. и эксперимент. минералогии. Т. 8. Новосибирск: Наука, 1975. С. 107–147.
- Семиколенных Е.С. Минералого-геохимические особенности хромититов горизонта UG-2 восточной части Бушвелдского комплекса, ЮАР: Автореф. канд. дисс. СПбГУ, 2013. 174 с.
- Служеникин С.Ф., Дистлер В.В., Туровцев Д.М. и др. Малосульфидное платиновое оруденение в Норильских дифференцированных интрузивах // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36, № 3. С. 195–217.
- Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. С. 52–79.
- Спиридонов Э.М. Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. М.: Макс Пресс, 2019. С. 41–113.
- 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., Ладыгин В.М., Степанов В.К. и др. Метавулканы пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 212 с.
- 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., Martin R.F., Alapieti T.T. Zoned sulfides and sulfoarsenides of the platinum-group elements from the Penicat layered complex, Finland // Canad. Mineral. 2004a. Vol. 42. P. 515–537.
- Barkov A.Y., Fleet M.E., Martin R.F., Tarkian M. Compositional variations in oulankite and a new series of argentoan oulankite from the Lakkulaisvaara layered intrusion, northern Russian Karelia // Canad. Mineral. 2004b. Vol. 42. P. 439–453.
- Berni G.J., Heinrich C.A., Lobato L.M. et al. The Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajas, Brazil: geochemistry, mineralogy, and zoning of hydrothermal alteration // Econ. Geol. 2014. Vol. 109 (7). P. 1882–1899.
- Bowles J.F.W. Prassoite, vysotskite and keithconnite from the Freetown Layered Complex, Sierra Leone // Mineral. Petrol. 2000. Vol. 68. P. 75–84.
- Cabri L.J., Laflamme J.H.G., Stewart J.M. et al. On cooperite, braggite, and vysotskite // Amer. Mineral. 1978. Vol. 63. P. 832–839.
- Criddle A.L., Stanley C.J. Characteristic optical data for cooperite, braggite and vysotskite // Canad. Mineral. 1985. Vol. 23. P. 144–162.
- Evgstigneeva T., Moh G.H., Tarkian M. Hydrothermal recrystallization of PGE- and Fe-Ni-sulfide assemblages // Neues Jahrb. Mineral. Abh. 1995. Bd. 169. S. 273–277.
- Junge M., Obertür T., Melcher F. Cryptic variation of chromite chemistry, platinum group elements and platinum group minerals distribution in the UG-2 chromitite: an example from the Karee mine, Western Bushveld Complex, South Africa // Econ. Geol. 2014. Vol. 109, N 3. P. 795–810.
- Merkle R.K.W., Winkels-Herding S., Botha A.J., Verryn S.M.C. Compositional variation of co-existing braggite and vysotskite grains from the UG-2, Western Bushveld Complex // 7th Intern. Platinum Symp. (Moscow, Russia). 1994. P. 73–74.

Moreno T., Prichard H.M., Lunar R. et al. Formation of a secondary platinum-group mineral assemblage in chromitites from the Herbeira ultramafic massif in Cabo Ortegal, NW Spain // *Eur. J. Mineral.* 1999. Vol. 11. P. 363–378.

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.

Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. Gold and silver in PGE–Cu–Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia // *Mineral. Deposita.* 2015. Vol. 50. P. 465–492.

Spiridonov E.M., Kulagov E.A., Serova A.A. et al. Genetic Pd, Pt, Au, Ag, and Rh mineralogy in Noril'sk sulfide ores // *Geology Ore Deposits.* 2015. Vol. 57, N 5. P. 402–432.

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.

Talkington R.W., Lipin B.R. Platinum group minerals in chromite seams of the Stillwater Complex, Montana // *Econ. Geol.* 1986. Vol. 81. P. 1174–1186.

Verryn S.M.C., Merkle R.K.W. Compositional variation of cooperite, braggite, and vysotskite from the Bushveld Complex // *Mineral. Mag.* 1987. Vol. 58. P. 223–234.

Verryn S.M.C., Merkle R.K.W. The system PtS–PdS–NiS between 1200 °C and 700 °C // *Canad. Mineral.* 2002. Vol. 40. P. 571–584.

Volbort A., Tarkian M., Stumpfl E.F., Housley R.M. A survey of the Pd — Pt mineralization along the 35-km strike of the J-M Reef, Stillwater Complex, Montana // *Canad. Mineral.* 1986. Vol. 24. P. 329–346.

Поступила в редакцию 02.07.2020

Поступила с доработки 12.10.2020

Принята к публикации 12.10.2020