

---



---

**МИНЕРАЛЫ  
И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ**

---



---

**ПЛАТИНИСТЫЙ ВЫСОЦКИТ С ОБРАТНОЙ ЗОНАЛЬНОСТЬЮ  
И СКЕЛЕТНЫЙ КУПЕРИТ ИЗ МЕТАМОРФИЗОВАННЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД  
ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
НОРИЛЬСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ**

© 2020 г. д. чл. Э. М. Спиридонов<sup>1, \*</sup>, С. Н. Беляков<sup>1</sup>, Ю. А. Иванова<sup>1</sup>,  
К. В. Егоров<sup>1</sup>, Д. И. Наумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет, геологический факультет, Воробьевы Горы,  
Москва, 119991 Россия*

*\*e-mail: emstspiridon@gmail.com*

Поступила в редакцию 06.08.2020 г.

После доработки 28.09.2020 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Описаны своеобразные метакристаллы платинистого высокоцита с обратной зональностью. Их размер до 0.5 мм. Для этих метакристаллов характерна структура “паракристаллического микробудинажа”: корродированные фрагменты высокоцита 1-го зарождения  $(Pd_{0.51}Pt_{0.27}Ni_{0.20}Fe_{0.02})S$  и 2-го зарождения  $(Pd_{0.49}Pt_{0.30}Ni_{0.18}Fe_{0.03})S$ , квадратные микрокристаллы высокоцита 3-го зарождения  $(Pd_{0.47}Pt_{0.32}Ni_{0.19}Fe_{0.02})S$  обросли высокоцитом 4-го зарождения  $(Pd_{0.45}Pt_{0.33}Ni_{0.19-0.21}Fe_{0.01})S$ ; на эти образования нарос высокоцит 5-го зарождения  $(Pd_{0.45}Pt_{0.35}Ni_{0.18}Fe_{0.02})S$  с каймами высокоцита 6-го зарождения –  $(Pd_{0.43}Pt_{0.37-0.38}Ni_{0.16-0.17}Fe_{0.02})S$  и наиболее платинистого по составу высокоцита 7-го зарождения  $(Pd_{0.44}Pt_{0.43}Ni_{0.09}Fe_{0.02}Ru_{0.01})S$ . Метакристаллы платинистого высокоцита окружены широкой каймой скелетных микрокристаллов куперита  $(Pt_{0.96-0.97}Ni_{0-0.03}Ru_{0.01})S$ . Платинистый высокоцит и куперит развиты в низкоградно метаморфизованных Co–Ni–Cu сульфидных рудах Октябрьского месторождения Норильского рудного поля, где они заместили железистые хлорит и корренсит, гидрогроссуляр, халькопирит, пентландит, кубанит, фассаит.

*Ключевые слова:* метаморфогенно-гидротермальные платинистый высокоцит с обратной зональностью, куперит, Норильское рудное поле

**DOI:** 10.31857/S0869605520060131

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Платиновые металлы при повышенных температурах имеют сильное сродство с серой. Наиболее распространенные минералы платиновых металлов – сульфиды; для платины и палладия – это моносльфиды: куперит PtS, брэггит (Pt, Pd, Ni)S, высокоцит (Pd, Pt, Ni)S. Куперит, брэггит и высокоцит – главные промышленные минералы гигантских Pd–Pt месторождений интрузива Бушвелд (Adam, 1933; Brynard et al., 1976; Cabri et al., 1978; Verryn, Merkle, 1987; Von Gruenewaldt et al., 1990; Семиколенных, 2013; Junge et al., 2014), крупных Pd–Pt месторождений интрузивов Стиллуотер (Talkington, Lipin, 1986; Volbort et al., 1986) и Великой Дайки (Oberthür et al., 2003); здесь они ассоциируют с хромшпинелидами. Судя по экспериментальным данным, куперит начинает кристаллизоваться из расплава при температуре ниже 1200 °С, брэггит – ниже 1000 °С, высокоцит – ниже 900 °С (Verryn, Merkle, 2002). По этой причине зо-

нальность кристаллов моносльфидов Pt–Pd с ядром из куперита, окруженным брэггитом, и с внешней зоной из высокоцита, в рудах Бушвелда и Стиллуотера (Criddle, Stanley, 1985), – прямая, отвечающая кристаллизации при снижении температуры.

Куперит, брэггит и высокоцит с широкими вариациями состава были обнаружены и в норильских сульфидных рудах (Годлевский, Шумская, 1960; Генкин, Звягинцев, 1962; Генкин, 1968; Лапутина, Генкин, 1975; Генкин и др., 1981; Sluzhenikin, Mokhov, 2015). В результате многие геологи стали считать наличие минералов ряда куперит–брэггит–высоцит в рудах признаком магматического происхождения этих руд.

Согласно экспериментальным данным, куперит, брэггит и высокоцит формируются также при участии средне- и низкотемпературных (до 150 °С) гидротермальных (или метаморфогенно-гидротермальных) растворов (Evstigneeva et al., 1995). Таковы природные высокоцит, брэггит и куперит – продукты гидротермального замещения ранее возникших гидротермальных самородных палладия, платины–палладия и платины в гематит-кварцевых жилах телетермальных Au–Pt–Pd месторождений (Berni et al., 2014). Таков голотип высокоцита в норильских магматогенных сульфидных рудах, который ассоциирует с миллеритом и полидимитом (Генкин, Звягинцев, 1962). Таковы природные высокоцит, брэггит и куперит – продукты низкоградного метаморфизма магматогенной Pt–Pd минерализации различного типа; здесь высокоцит и брэггит ассоциируют с такими низкотемпературными минералами как миллерит и актинолит, а также с сульфоарсенидами платиновых металлов (Moreno et al., 1999; Barkov et al., 2004a, 2004b).

Ниже описан своеобразный парагенез платинистого высокоцита и куперита из метаморфизованных норильских сульфидных руд.

## 2. 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). Магматические Ag–Au–Pt–Pd–Co–Ni–Cu месторождения сопряжены с интрузивами норильского типа, одними из наиболее поздних производных грандиозной Сибирской трапповой формации, возникшей на рубеже перми и триаса (Годлевский, 1959; Маслов, 1963; Люлько и др., 1987; Степанов, Туровцев, 1988). Богатейшее Октябрьское месторождение Талнахского рудного узла приурочено к Хараелахскому интрузиву; основные рудные залежи тяготеют к нижнему контакту интрузива (Ваулин, Суханова, 1970). Норильские руды – продукты кристаллизации сульфидных расплавов – слагают залежи и жилы, вкрапленность в интрузивных породах и роговиках рамы интрузивов. Первичные руды сложены продуктами субсолидусных превращений высоко температурных сульфидных твердых растворов – это пирротин, троилит, кубанит, халькопирит, пентландит, талнахит (Годлевский, 1959; Генкин и др., 1981; Степанов, Туровцев, 1988). Каждое тело магматических сульфидов – от миникапель до крупных залежей – окружено ореолами флюидного воздействия с высокотитанистым биотитом – флогопитом, хлорпаргаситом, фторхлорапатитом, джерфишеритом...; размер ореолов коррелирован с размером тел сульфидов (Степанов, Туровцев, 1988; Спиридонов, 2010, 2019). Большая часть Pd, Pt, Au и Ag в первичных норильских рудах образует в них собственные минералы – интерметаллиды и близкие к ним теллуриды, висмутиды, станниды, антимониды, арсениды, сульфидов среди них нет (Изоитко, 1997; Спиридонов, 2010, 2019). Эти минералы благородных металлов слагают метасомы и метакристаллы среди первичных сульфидов и окружающих силикатов. Контурсы 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; Спиридонов и др., 2020).

### 3. ПРОЯВЛЕНИЯ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОГО НИЗКОГРАДНОГО МЕТАМОРФИЗМА В НОРИЛЬСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ

По нашим данным, минеральный состав пород и руд Норильского рудного поля сформирован в два этапа: 1 этап – синтрапповая магматогенная минерализация с пневматолитовым продолжением (рассмотрены выше), 2 этап – посттрапповая метаморфогенно-гидротермальная минерализация (Спиридонов, Гриценко, 2009; Spiridonov et al., 2016). Ранее образования 2 этапа рассматривали как производные трапповой формации (Годлевский, 1959; Степанов, Туровцев, 1988 и др.) или как продукты региональной гидротермальной деятельности (Горяинов, Аглонов, 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-пумпеллитовой, и далее – цеолитовой фаций. Фации метаморфизма определены по минеральным ассоциациям по аналогии с данными (Philpotts, Ague, 2009). Rb/Sr возраст процессов метаморфизма: первая дата – 232 млн лет, последняя – 122 млн лет; максимальные параметры метаморфизма – 1.8–2.5 кбар 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, Гриценко, 2009; Spiridonov et al., 2016). В магматогенных пентландит-халькопирит-кубанит-пирротиновых рудах вдоль отдельных 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 пирит–магнетит, халькопирит и магнетит (без структур распада), миллерит, валлерит, макинавит, низкие борнит и халькозин, гизингерит, хизлевудит, годлевскит, полидимит, гематит, игольчатый кубанит, сфалерит, вюрцит, галенит, кобальт-, купро- и аргентопентландит, паркерит, шэндит, гаухекорнит, точилит, алабандин, гётит, самородные серебро, мышьяк и висмут, сульфоарсениды, арсениды, сульфоантимониды и антимониды Fe–Ni–Co, клаусталит, касситерит, станнин, хоулит, уранинит, антимонит, киноварь (Годлевский, Шумская, 1960; Генкин, Звягинцев, 1962; Будько и др., 1966; Золотухин и др., 1967; Кулагов и др., 1967, 1969; Генкин, 1968; Золотухин, 1970; Рябов, 1975; Горяинов, Аглонов, 1980; Генкин и др., 1981; Спиридонов, Гриценко, 2009; Спиридонов, 2010, 2019; Spiridonov et al., 2015, 2016). Обычно с ними ассоциируют ангидрит, кальцит, доломит, анкерит, хлорит, кварц, пренит, гидрогранаты, серпентины, брусит, ксонотлит, сапонит, стильпноме-лан, пектолит, тоберморит, датолит, апофиллит, ильваит, бабингтонит, халцедон, цеолиты (ломонтит, стильбит и др.), окенит, тальк, минералы группы гидроталькита, барит, таумасит, хибингит, 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, данный Pb – коровый. Это свидетельствует о независимости от траппов источника вещества метаморфогенно-гидротермальных жил (Спиридонов и др., 2010).

### 4. РЕГЕНЕРИРОВАННАЯ ВКРАПЛЕННАЯ МЕТАМОРФОГЕННО-ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ Pt–Pd–Ag МИНЕРАЛИЗАЦИЯ НОРИЛЬСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Эта минерализация развита среди метаморфизованных руд, богатых благородными металлами. Регенерированные минералы серебра – распространенные самородное

серебро, не содержащее золота, и аргентопентландит  $\text{AgFe}_5\text{Ni}_3\text{S}_8$ , реже – твердый раствор халькопирит–ленаит  $\text{AgFeS}_2$ , серебросодержащий борнит, значительно реже – ртутистое серебро, акантит, ялпаит, штромейерит, аргентопирит, науманнит. Регенерированные минералы палладия и платины – это паоловит  $\text{Pd}_2\text{Sn}$ , не содержащий сурьму и золото, Ag паоловит  $(\text{Pd},\text{Ag})_2\text{Sn}$ , высокоцит, куперит, брэггит, Pd-брейтгауптит  $(\text{Ni},\text{Pd})\text{Sb}$ , Pd-орселит  $(\text{Ni},\text{Pd})_5\text{As}_2$ , палладоарсенид  $\text{Pd}_2\text{As}$ , винсентит  $\text{Pd}_3\text{As}$ , хараелахит  $(\text{Pt},\text{Cu},\text{Pb},\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$ , фрудит  $\text{PdBi}_2$ , соболевскит  $\text{PdBi}$ , не содержащий теллур и сурьму, малышевит  $\text{CuBiPdS}_3$ , самородные палладий и платина (Спиридонов, 2010, 2019; Spiridonov et al., 2015, 2016). Регенеративные интерметаллиды палладия (паоловит, фрудит, соболевскит), его арсениды (палладоарсенид, винсентит, орселит) и стибниды (брейтгауптит) развиты среди руд, метаморфизованных при повышенной активности кислорода и низкой активности сульфидной серы, – среди метаруд, богатых ангидритом и магнетитом, борнитом или халькозином, с хизлевудитом  $\text{Ni}_3\text{S}_2$  и/или годлевскитом  $\text{Ni}_9\text{S}_8$ , касситеритом, оловосодержащими гидрогранатами. Самородная платина изредка образует тонкие каймы замещения вокруг кристаллов сперилита (Евстигнеева и др., 1990). Регенеративные палладий-содержащие сульфиды (высоцит, брэггит, куперит, хараелахит, малышевит) развиты среди руд, метаморфизованных при относительно повышенной активности сульфидной серы, – среди метаруд с халькопиритом, миллеритом  $\text{NiS}$  и полидимитом  $\text{Ni}_3\text{S}_4$ . Хараелахит иногда нарастает на высокоцит, куперит – на хараелахит, самородный палладий или куперит – на самородную платину.

Эти образования возникли при воздействии углекисло-хлоридных флюидов с изменчивыми, но в целом повышенными  $f\text{O}_2$  и щелочностью. Это растворы  $\text{NaCl-MgCl}_2$  с соленостью от 15 до 0.4 мас. % эквивалента  $\text{NaCl}$  (примерно две трети флюидных включений) и растворы  $\text{NaCl-CaCl}_2 (\pm \text{NaHCO}_3)$  с соленостью от 23 до 6.5 мас. % экв.  $\text{NaCl}$  (одна треть включений) с температурами от 270 °C, обычно от 250–216 до 140–120 °C, и давлениями от 1.2 до 0.3 кбар (Спиридонов, Гриценко, 2009).

## 5. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучена коллекция сульфидных руд восточного фланга Октябрьского месторождения, отобранных в подземных выработках С.Н. Беляковым 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; 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  $\text{FeS}_2$  (S), алтаит  $\text{PbTe}$  (Pb, Te), синтетические InAs (As) и CdSe (Cd, Se). В тексте статьи и на рисунках единая нумерация химических анализов высокоцита.

## 6. МЕТАМОРФИЗОВАННЫЕ СУЛЬФИДНЫЕ РУДЫ С ПЛАТИНИСТЫМ ВЫСОЦКИТОМ И КУПЕРИТОМ ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Эти сплошные и импреняционные сульфидные Co–Ni–Cu руды развиты среди магнетит-плагиоклаз-фассаитовых эндоскарнов. Преобладающий минерал этих скарнов – богатый Al клинопироксен – фассаит от почти безжелезистого в ядрах кристаллов до умеренно железистого. В скарнах широко распространены небольшие кубооктаэдрические кристаллы магнетита с тончайшими пластинками распада ильменита. Сульфидный материал – пластинчатые и зернистые агрегаты халькопирита, пентлан-

дита, пирротина, кубанита — продукты субсолидусных превращений высокотемпературных твердых растворов и перекристаллизации продуктов превращений. Размер реликтов кристаллов высокотемпературных сульфидных твердых растворов до 35 мм в поперечнике. Размер зерен сульфидов перекристаллизованных агрегатов обычно не более 30–70 мкм. Состав халькопирита стехиометричен. Состав пентландита довольно устойчив — это стандартный бедный кобальтом (около 1 мас. %) пентландит, с небольшим преобладанием никеля над железом. Отдельные более крупные выделения пентландита содержат тончайшие редкие пластинки распада аргентопентландита. Пирротин устойчивого состава, близкого к  $\text{Fe}_8\text{S}_9$ . Среди продуктов распада первичных сульфидных твердых растворов, богатых медью, — мелкие с поперечником до 5 микрон выделения железистого сфалерита, бедного Cd, и точечные выделения галенита. Распространенные пневматолитовые минералы благородных металлов в этих рудах — висмутистый котульскит, мончеит, мертиит-II, меншиковит, серебристое золото, электрум, сперилит (Спиридонов и др., 2020).

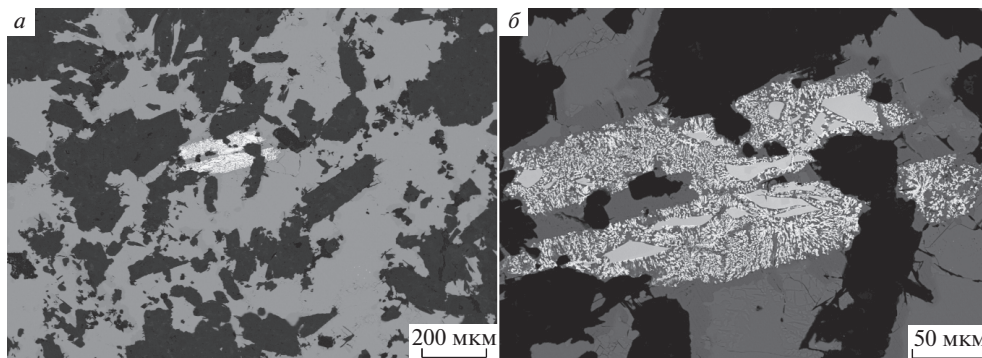
В низкоградно метаморфизованных скарнах заметная часть фассаита замещена хлоритом — шамозитом (железистым рипидолитом—брунсвицитом по классификации М. Хея, 1954)  $(\text{Fe}_{3.06}^{2+}\text{Al}_{1.56}\text{Mg}_{1.29}\text{Mn}_{0.09})_6[(\text{OH})_8/(\text{Si}_{2.44}\text{Al}_{1.56})_4\text{O}_{10}]$  и Fe–Al корренситом  $\text{Mg}_{0.33}(\text{Fe}_{4.48}^{2+}\text{Al}_{2.22}\text{Mg}_{1.77}\text{Fe}_{0.39}^{3+}\text{Mn}_{0.14})_9[(\text{OH})_{10}/(\text{Si}_{4.73}\text{Al}_{3.27})_8\text{O}_{20}]$ ; плагиоклаз замещен гидрогроссуляром —  $(\text{Ca}_{2.83}\text{Mg}_{0.13}\text{Mn}_{0.02}^{2+}\text{Fe}_{0.02}^{3+})_3(\text{Al}_{1.82}\text{Fe}_{0.18}^{3+})_2[(\text{SiO}_4)_{2.62}(\text{O}_4\text{H}_4)_{0.38}]$ .

Высоцкит и куперит развиты среди метаморфизованных пентландит-пирротин-кубанит-халькопиритовых руд, богатых благородными металлами. В процессе низкоградного метаморфизма первичные сульфиды были частично замещены сростаниями миллерита и халькопирита (без структур распада), с вкраплениями пирита и полидимита.

## 7. ПЛАТИНИСТЫЙ ВЫСОЦКИТ С ОБРАТНОЙ ЗОНАЛЬНОСТЬЮ

Уплотненные метакристаллы платинистого высокоцита распределены крайне неравномерно, отдельными небольшими скоплениями длиной до 500, обычно не более 200 мкм (рис. 1, рис 2). Границы метакристаллов высокоцита секут сростания железистых хлорита и корренсита, халькопирита и пентландита, халькопирита и миллерита. Метакристаллы высокоцита неоднородны по составу и строению.

Наиболее ранние деформированные и корродированные фрагменты кристаллов выделены как высокоцит первого зарождения (рис. 2, а, 2, б, 1); этот высокоцит по составу наиболее богат палладием и никелем —  $(\text{Pd}_{0.51}\text{Pt}_{0.27}\text{Ni}_{0.20}\text{Fe}_{0.02})\text{S}$ , Pd/Pt = 1.88 (табл. 1, ан. 1). Высоцкит второго зарождения изредка нарастает на высокоцит первого зарождения; на приведенных рисунках высокоцит второго зарождения (рис. 2, в, 2) слагает деформированные фрагменты среди высокоцита четвертого зарождения; состав высокоцита второго зарождения несколько богаче Pt и беднее Pd и Ni —  $(\text{Pd}_{0.49}\text{Pt}_{0.30}\text{Ni}_{0.18}\text{Fe}_{0.03})\text{S}$ , Pd/Pt = 1.63 (табл. 1, ан. 2). Квадратные микрокристаллы высокоцита третьего зарождения (рис. 2, в, 2, г, 3) изредка слагают включения среди высокоцита четвертого зарождения; на приведенных рисунках высокоцит третьего зарождения включен в высокоцит пятого (6) и шестого зарождений (7 и 8); состав высокоцита третьего зарождения —  $(\text{Pd}_{0.47}\text{Pt}_{0.32}\text{Ni}_{0.19}\text{Fe}_{0.02})\text{S}$ , Pd/Pt = 1.49 (табл.1, ан. 3). Высоцкит четвертого зарождения нарастает на высокоцит первого зарождения (рис. 2, б, 5) и слагает обособленные метакристаллы, а также несколько корродированные выделения (рис. 2, г, 4) среди высокоцита пятого зарождения (рис. 2, г, 6); высокоцит четвертого зарождения еще богаче Pt и беднее Pd —  $(\text{Pd}_{0.44-0.45}\text{Pt}_{0.33}\text{Ni}_{0.19-0.21}\text{Fe}_{0.01-0.02})\text{S}$ , Pd/Pt = 1.38–1.34 (табл. 1, ан. 4, 5). Высоцкит пятого зарождения слагает обособленные метакристаллы, а также нарастает (рис. 2, в, 2, г, 6) на выделения высокоцита второго, третьего и четвертого зарождений; высокоцит пятого зарождения еще богаче Pt и беднее Pd и Ni —



**Рис. 1.** Метаморфизованные сульфидные руды восточного фланга Октябрьского месторождения. (а) Скопление метакристаллов высокоцита и куперита (светлые) в метаморфизованных сульфидных рудах с миллеритом (светло-серые) с включениями силикатов (черные). (б) Метакристаллы высокоцита (светло-серые) с оторочками из множества скелетных микрокристаллов куперита (белые). Серое – сульфидная матрица. Черное – силикатная матрица. Изображения в отраженных электронах.

**Fig. 1.** Metamorphosed sulfide ores of the eastern flank of the Oktyabrskoye deposit.

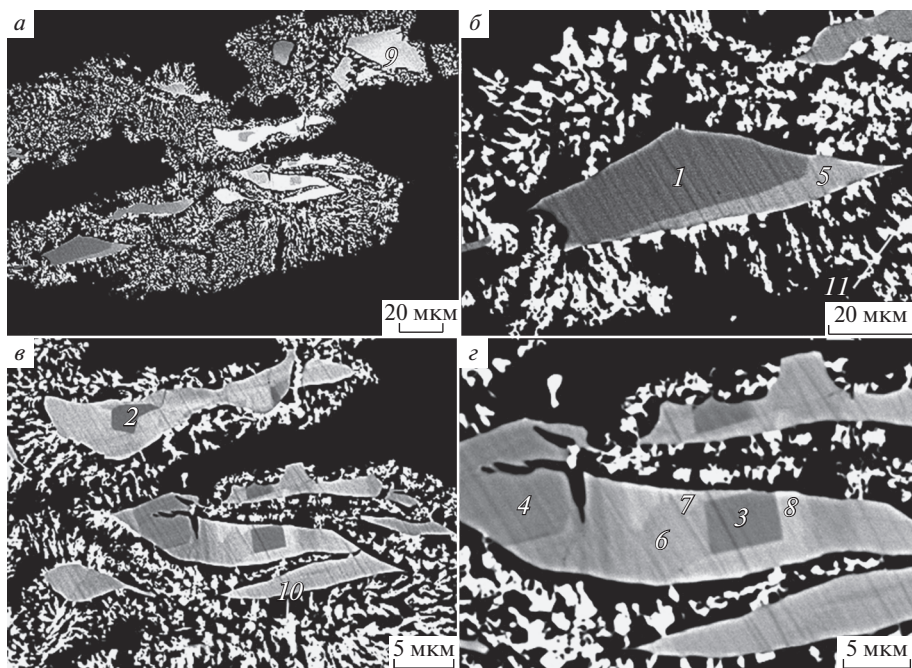
( $\text{Pd}_{0.45}\text{Pt}_{0.35}\text{Ni}_{0.18}\text{Fe}_{0.02}\text{S}$ ,  $\text{Pd}/\text{Pt} = 1.27$  (табл. 1 ан. 6). Высоцкит шестого зарождения (рис. 2, з, 7 и 8) слагает то узкие (первые мкм), то широкие (до 25 мкм) каймы замещения и обрастания на высокоците пятого зарождения; по составу высокоцит шестого зарождения еще богаче Pt и беднее Pd и Ni – ( $\text{Pd}_{0.43}\text{Pt}_{0.37-0.38}\text{Ni}_{0.16-0.17}\text{Fe}_{0.02}\text{S}$ ,  $\text{Pd}/\text{Pt} = 1.16-1.14$  (табл. 1, ан. 7, 8). Высоцкит седьмого зарождения развит крайне неравномерно, слагает широкие каймы замещения (рис 2, а, 9) вокруг высокоцита более ранних зарождений; высокоцит седьмого зарождения весьма богат Pt и заметно обеднен Ni – ( $\text{Pd}_{0.44}\text{Pt}_{0.43}\text{Ni}_{0.09}\text{Fe}_{0.02}\text{Ru}_{0.01}\text{S}$ ,  $\text{Pd}/\text{Pt} = 1.03$  (табл. 1, ан. 9).

Таким образом, для описанных метакристаллов высокоцита характерна сложная, в целом, обратная зональность: их внутренние зоны обогащены Pd, внешние зоны обогащены Pt. Строение сложно зональных метакристаллов платинистого высокоцита метаморфизованных руд Октябрьского месторождения похоже на строение сложно зональных метакристаллов – порфиробластов щелочных амфиболов в метаморфических породах фации голубых сланцев, для которых применен термин структура “паракристаллического микробудинажа” (Григорьев, Жабин, 1975). Этот термин хорошо объясняет процесс образования описанных выше сложно зональных метакристаллов платинистого высокоцита.

Изученный высокоцит по составу стехиометричен –  $\text{Me} : \text{S} = 1 : 1$  (5 анализов),  $\text{Me} : \text{S} = 0.99 : 1.01$  (3 анализа),  $\text{Me} : \text{S} = 1.01 : 0.99$  (1 анализ) (табл. 1). В его составе проявлен отчетливый изоморфизм палладия и платины. Содержания никеля существенно понижены в наиболее платинистом высокоците. Содержания железа в высокоците составляют 0.4–0.9 мас. % и повышены в наиболее палладистом высокоците. Содержания рутения (0.4–0.7 мас. %) и меди (от следов до 0.4 мас. %) меняются в высокоците не закономерно.

## 8. КУПЕРИТ

Корродированные метакристаллы платинистого высокоцита окружены широкими каймами скелетных микрокристаллов куперита с размером индивидов до 5 мкм (рис. 1, 2). Состав этого куперита колеблется в узких пределах – от бедного никелем до



**Рис. 2.** Метаморфизованные сульфидные руды восточного фланга Октябрьского месторождения. (а) Гнездо – скопление метакристаллов высокоцита (от серого до белого, 9 – высокоцит седьмого зарождения) с оторочкой из микрокристаллов куперита (светлые). (б) Метакристаллы высокоцита первого зарождения (темно-серый, 1) с оторочкой высокоцита четвертого зарождения (серый, 5), масса скелетного куперита (белый). (в) Уплощенные метакристаллы высокоцита от второго (2) до шестого зарождения, масса скелетного куперита (белый). (г) Уплощенные метакристаллы высокоцита третьего (3), четвертого (4), пятого (6) и шестого зарождений (7, 8), масса скелетного куперита (белый). Черное – силикатно-сульфидная матрица. Изображения в отраженных электронах. Цифрами показаны места и номера анализов высокоцита.

**Fig. 2.** Metamorphosed sulfide ores of the eastern flank of the Oktyabrskoye deposit.

практически безникелистого, палладий в нем не обнаружен (мас. %): Pt 83.76 и 84.38; Ru 0.37 и 0.43; Ni 0.86 и следы; S 13.32 и 14.60; сумма 99.31 и 99.41; формулы –  $(Pt_{0.960}Ni_{0.033}Ru_{0.008})_{1.001}S_{0.999}$  и  $(Pt_{0.970}Ru_{0.009})_{0.979}S_{1.021}$  (табл. 2). Между составами более раннего платинистого высокоцита и более позднего куперита весьма существенный разрыв (рис. 3).

А.Г. Мочалов высказал предположение, что описанные выше образования возможно представляют собой теньевую псевдоморфозу с коррозионной текстурой реликтового протоминерала состава  $(Pd,Pt,Ni)S$  в микроагрегате новообразованных куперита, сульфидов и силикатов. В норильских рудах такие новообразования отсутствуют.

## 9. ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций Co–Ni–Cu сульфидных рудах Октябрьского месторождения Норильского рудного поля развиты метакристаллы высокоцита с обратной зональностью. Они сложены платинистым высокоцитом семи зарождений. Состав высокоцита первого зарождения –

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) платинистого висоцкита. Метаморфизованные сульфидные руды восточного фланга Октябрьского месторождения**Table 1.** Chemical composition (wt %) of platinoan vysotskite. Metamorphosed ores at eastern flank of the Oktyabrskoye deposit

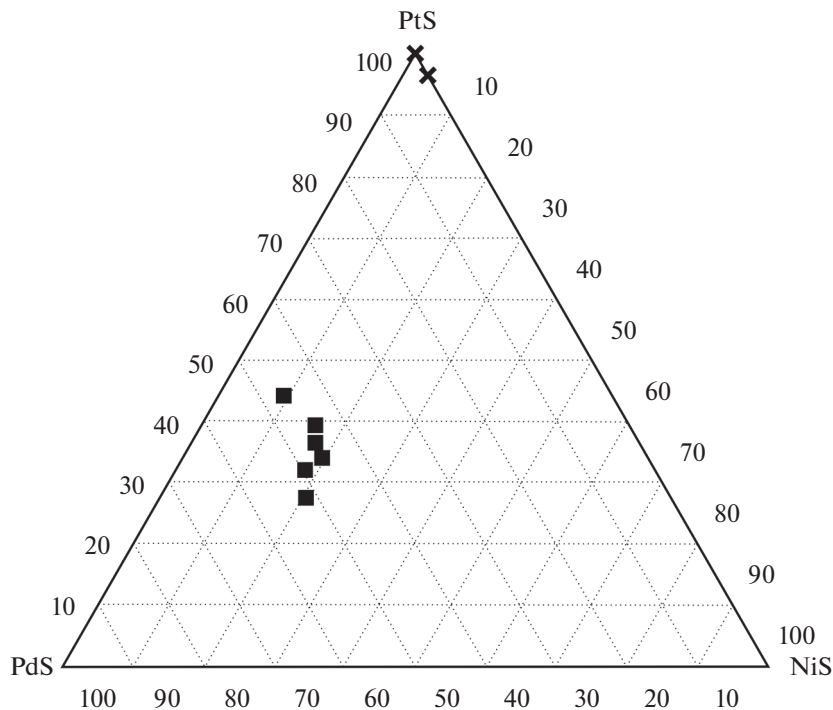
Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pd	35.36	33.22	31.86	31.15	30.28	29.70	28.22	28.18	27.61
Pt	34.51	37.31	39.30	41.56	41.38	43.06	44.57	45.96	48.69
Ru	0.46	0.50	0.56	0.59	0.53	0.74	0.55	0.49	0.42
Ni	7.88	6.91	6.98	7.87	7.22	6.55	6.00	5.82	3.18
Fe	0.63	0.91	0.40	0.39	0.56	0.41	0.45	0.47	0.38
Cu	0.24	0.23	0.44	нпо	0.35	0.23	0.25	0.44	0.28
S	20.98	20.37	20.54	20.73	20.70	20.00	19.83	19.55	19.90
Сумма	100.06	99.45	100.08	102.29	101.02	100.69	99.87	100.91	99.46
Коэффициенты в формуле в расчете на 2 атома									
Pd	0.505	0.487	0.468	0.451	0.443	0.446	0.431	0.431	0.444
Pt	0.269	0.299	0.315	0.328	0.330	0.352	0.371	0.383	0.427
Ru	0.007	0.008	0.009	0.009	0.008	0.012	0.009	0.008	0.007
Ni	0.204	0.184	0.186	0.207	0.191	0.178	0.166	0.161	0.093
Fe	0.017	0.025	0.011	0.011	0.016	0.012	0.013	0.014	0.012
Cu	0.006	0.005	0.010	—	0.009	0.006	0.006	0.011	0.008
S	0.993	0.992	1.001	0.995	1.003	0.995	1.004	0.991	1.009
Pd/Pt	1.88	1.63	1.49	1.38	1.34	1.27	1.16	1.13	1.04

**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) куперита. Восточный фланг Октябрьского месторождения  
**Table 2.** Chemical composition (wt %) of cooperite. Metamorphosed ores at eastern flank of the Oktyabrskoye deposit

Компонент	10	11
Pt	81.76	84.38
Ni	0.86	нпо
Ru	0.37	0.43
S	16.32	17.60
Сумма	99.31	102.41
Коэффициенты в формуле в расчете на 2 атома		
Pt	0.886	0.878
Ni	0.031	—
Ru	0.008	0.009
S	1.075	1.113

(Pd<sub>0.51</sub>Pt<sub>0.27</sub>Ni<sub>0.20</sub>Fe<sub>0.02</sub>)<sub>1</sub>S, последнего – седьмого – (Pd<sub>0.44</sub>Pt<sub>0.43</sub>Ni<sub>0.09</sub>Fe<sub>0.02</sub>Ru<sub>0.01</sub>)<sub>1</sub>S. Для метакристаллов платинистого висоцкита характерна структура “паракристаллического микробудинажа”. Корродированные метакристаллы платинистого висоцкита окружены каймами скелетных микрористаллов куперита (Pt<sub>0.96–0.97</sub>Ni<sub>0–0.03</sub>Ru<sub>0.01</sub>)<sub>1</sub>S. Источниками палладия и платины для регенеративных висоцкита и куперита послужили обильные котульскит, мончеит, сперрилит и иные первичные минералы платино-





**Рис. 3.** Вариации состава платинового висоцкита и куперита метаморфизованных сульфидных руд восточного фланга Октябрьского месторождения.

**Fig. 3.** Variations in the composition of platinumian vysotskite and cooperite of metamorphosed sulfide ores at the eastern flank of the Oktyabrskoye deposit.

вых металлов, которыми богаты руды Октябрьского месторождения (Спиридонов и др., 2020).

Особенности морфологии и эволюции состава описанных моносulfидов Pd–Pt норильских руд – еще одно свидетельство глубоких различий Pd–Pt месторождений: гигантов Бушвелда и Норильска (Антибушвелда).

**Благодарности.** Авторы благодарны Н.Н. Кортаевой за высокое качество микронзондовых анализов и А.Г. Мочалову за интересные замечания.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Будько И.А., Изюитко В.М., Кулагов Э.А., Митенков Г.А. Макинавит и валлериит в рудах Норильска и Галнаха // Уч. Зап. НИИГА. Рег. Сер. **1966**. Вып. 5. С. 203–209.

Ваулин Л.Л., Суханова Е.Н. Октябрьское медно-никелевое месторождение // Разведка и охрана недр. **1970**. № 4. С. 48–51.

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

Генкин А.Д., Звягинцев О.Е. Высоцкит, новый сульфид палладия и никеля // ЗВМО. **1962**. Ч. 91. Вып. 6. С. 718–725.

Генкин А.Д., Дистлер В.В., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л., Коваленкер В.А., Служеникин С.Ф., 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., Шумская Н.И. Халькопирит-миллеритовые руды месторождения Норильск I // Геол. рудн. месторождений. **1960**. № 6. С. 61–72.

Горяинов И.Н., Аллонов В.С. Региональная гидротермальная деятельность на северо-западе Сибирской платформы // Геология и геофизика. **1980**. № 7. С. 35–43.

Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов. Индивиду. М.: Наука, **1975**. 339 с.

Евстигнеева Т.Л., Ким А.А., Некрасов И.Я. О деарсенизации сперрилита в природе // Минерал. журнал. **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-пумпеллитовая парагенетическая ассоциация в метасоматитах Норильска. В кн.: Мат. по генетич. и эксперимент. 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 // Геол. рудн. месторождений. **1969**. Т. 11. № 3. С. 115–121.

Кулагов Э.А., Изоитко В.М., Митенков Г.А. Хизлевулит 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–высоцкит / Изоморфизм в минералах. М.: Наука. **1975**. С. 146–150.

Льолько В.А., Амосов Ю.Н., Душаткин А.Б. Тектоника, рудоконтролирующие структуры и металлогенетическое 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.

Рябов В.В. Некоторые особенности минералогии метасоматитов из ореола Талнахской дифференцированной рудоносной интрузии (северо-запад Сибирской платформы) / Мат. 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. Дисс. канд. геол.-мин. наук. **2013**. СПбГУ. 174 с.

Спиридонов Э.М. Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. М.: Макс Пресс, **2019**. С. 41–113.

Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. **2010**. С. 52–79.

Спиридонов Э.М., Беляков С.Н., Кортаева Н.Н., Егоров К.В., Иванова Ю.А., Наумов Д.И., Серова А.А. Меньшиковит  $\text{Pd}_3\text{Ni}_2\text{As}_3$  и ассоциирующие минералы сульфидных руд восточного фланга Октябрьского месторождения, Норильское рудное поле // Вестн. МГУ. Геология. **2020**. № 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.

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

## Platinoan Vysotskite with Inverse Zoning and Skeletal Cooperite in Metamorphosed Sulphide Ores Within the Eastern Flank of the Oktyabrskoye Deposit, Norilsk Ore Field

E. M. Spiridonov<sup>a,\*</sup>, S. N. Belyakov<sup>a</sup>, Yu. A. Ivanova<sup>a</sup>, K. V. Egorov<sup>a</sup>, and D. I. Naumov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

\*e-mail: emstspiridon@gmail.com

Peculiar metacrystals of platinoan vysotskite with inverse zoning are described. Their size is up to 0.5 mm. These metacrystals are characterized by “paracrystalline microboudinage” structure, specifically, corroded vysotskite fragments of the 1st generation ( $\text{Pd}_{0.51}\text{Pt}_{0.27}\text{Ni}_{0.20}\text{Fe}_{0.02}\text{S}$ ) and 2nd generation ( $\text{Pd}_{0.49}\text{Pt}_{0.30}\text{Ni}_{0.18}\text{Fe}_{0.03}\text{S}$ ); square vysotskite microcrystals of the 3rd generation ( $\text{Pd}_{0.47}\text{Pt}_{0.32}\text{Ni}_{0.19}\text{Fe}_{0.02}\text{S}$ ) overgrown with

vysotskite of the 4th generation ( $\text{Pd}_{0.45}\text{Pt}_{0.33}\text{Ni}_{0.19-0.21}\text{Fe}_{0.01}\text{S}$ ); vysotskite of the 5th generation ( $\text{Pd}_{0.45}\text{Pt}_{0.35}\text{Ni}_{0.18}\text{Fe}_{0.02}\text{S}$ ) with both vysotskite bands of the 6th generation ( $\text{Pd}_{0.43}\text{Pt}_{0.37-0.38}\text{Ni}_{0.16-0.17}\text{Fe}_{0.02}\text{S}$ ) and the most platinic vysotskite of the 7th generation ( $\text{Pd}_{0.44}\text{Pt}_{0.43}\text{Ni}_{0.09}\text{Fe}_{0.02}\text{Ru}_{0.01}\text{S}$ ) grows on these formations. Platinoan vysotskite metacrystals are surrounded by the wide band of skeletal cooperite microcrystals ( $\text{Pt}_{0.96-0.97}\text{Ni}_{0-0.03}\text{Ru}_{0.01}\text{S}$ ). Platinoan vysotskite and cooperite are developed in low-grade metamorphosed Co–Ni–Cu sulphide ores of the Oktyabrskoye deposit within the Norilsk ore field, where these minerals replace ferrous chlorite and corrensite, hydrogrossular, chalcopyrite, pentlandite, cubanite, and fassaite.

*Keywords:* metamorphogenic-hydrothermal platinoan vysotskite with inverse zoning, cooperite, Norilsk ore field

## REFERENCES

- Adam H.R. A note on the minerals cooperite and braggite occurring in the platiniferous concentrates of the Transvaal. *J. South African Inst. Mining Metall.* **1933**. Vol. 34. P. 132–135.
- 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. Miner.* **2004a**. Vol. 42. P. 515–537.
- Barkov A. Y., Fleet M. E., Martin R. F., Tarkian M. Compositional variations in oulankit and a new series of argentoan oulankite from the Lukkulaivaara layered intrusion, northern Russian Karelia. *Canad. Miner.* **2004b**. Vol. 42. P. 439–453.
- Berni G. J., Heinrich C. A., Lobato L. M., Wail V. J., Rosiere C. A., Freitas M. A. 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.
- Brynard H. J., De Villiers J. P. R., Viljoen E. A. A mineralogical investigation of the Merensky Reef at the Western Platinum mine, near Marikana, South Africa. *Econ. Geol.* **1976**. Vol. 71(7). P. 1299–1307.
- Bud'ko I. A., Izoitko V. M., Kulagov E. A., Mitenkov G. A. Macinavite and valleriite in Norilsk and Talnakh ores. *Proc. NIIGA. Reg. ser.* **1966**. Vol. 6. P. 203–209 (in Russian).
- Cabri L. J., Laflamme J. H. G., Stewart J. M., Turner K., Skinner B. J. On cooperite, braggite, and vysotskite. *Amer. Miner.* **1978**. Vol. 63. P. 832–839.
- Criddle A. L., Stanley C. J. Characteristic optical data for cooperite, braggite and vysotskite. *Canad. Miner.* **1985**. Vol. 23. P. 144–162.
- Evsstigneeva 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.
- Evsstigneeva T. L., Kim A. A., Nekrasov I. Ya. About a dearsenization of sperrylite in the Nature. *Miner. J.* **1990**. Vol. 12. N 3. P. 90–96 (in Russian).
- Genkin A. D. Minerals of platinum metals and their associations in copper-nickel ores of the Norilsk deposit. Moscow: Nauka. **1968**. 106 p. (in Russian).
- Genkin A. D., Distler V. V., Filimonova A. A., Evstigneeva T. L., Kovalenker V. A., Sluzhenikin S. F., Laputina I. P., Smirnov A. V., Grokhovskaya T. L. Sulphide copper-nickel ores of the Norilsk deposits. Moscow: Nauka, **1981**. 234 p. (in Russian).
- Genkin A. D., Zvyagintsev O. E. Vysotskite, a new sulphide of palladium and nickel. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1962**. Vol 91. N 6. P. 718–725 (in Russian).
- Godlevsky M. N. Traps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region. Moscow: Gosgeoltekhizdat, **1959**. 89 p. (in Russian).
- Godlevsky M. N., Shumskaya N. I. Chalcopyrite-millerite ores of the Norilsk-I deposit. *Geol. Ore Deposits*. **1960**. N 6. P. 61–72 (in Russian).
- Goryainov I. N., Aplonov V. S. Regional hydrothermal activity in the northwest of the Siberian platform. *Geol. Geophys.* **1980**. N 7. P. 35–43 (in Russian).
- Grigoriev D. P., Zhabin A. G. Ontogeny of minerals. Individuals. Moscow: Nauka, **1975**. 339 p. (in Russian).
- Izoitko V. M. Technological mineralogy and ore evaluation. Saint-Petersburg: Nauka, **1997**. 582 p. (in Russian).
- 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(3). P. 795–810.
- Kulagov E. A., Evstigneeva T. L., Yushko-Zakharova O. E. A new nickel sulfide – godlevskite. *Geol. Ore Deposits*. **1969**. Vol. 11. N 3. P. 115–121 (in Russian).
- Kulagov E. A., Izoitko V. M., Mitenkov G. A. Heazlewoodite in sulfide copper-nickel ores of the Talnakh deposit. *Dokl. USSR Acad. Sci.* **1967**. Vol. 176. P. 900–902 (in Russian).

- Laputina I.P., Genkin A.D. About minerals of the braggite–vysotskite series. In: *Isomorphism in minerals*. Moscow: Nauka, **1975**. P. 146–150 (in Russian).
- Lyulko V.A., Amosov Yu.N., Dushatkin A.B. Tectonics, ore-controlling structures and metallogenic zoning of the Igarsko-Norilsk region. In: *Metallogeny of Siberia. Vol. 2*. Novosibirsk: Nauka, **1987**. P. 143–149 (in Russian).
- Maslov G.D. Tectonics of the Igarsko-Norilsk region and ore-controlling structures. In: *Tectonics of Siberia. Vol. 2*. Novosibirsk: Nauka, **1963**. P. 336–350 (in Russian).
- 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.
- 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. *Miner. 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.
- Ryabov V.V. Some features of the mineralogy of metasomatites from the aureole of the Talnakh differentiated ore-bearing intrusion (northwest of the Siberian platform). In: *Mat. on genetic. and experiment. mineralogy. Vol. 8*. Novosibirsk: Nauka, **1975**. P. 107–147 (in Russian).
- Semikolenykh E.S. Mineralogical and geochemical features of chromitites of the UG-2 horizon in the eastern part of the Bushveld complex, South Africa. PhD thesis. Saint-Petersburg: SPbSU, **2013**. 174 p. (in Russian).
- Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. Gold and silver in PGE–Cu–Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia. *Miner. Deposita*. **2015**. Vol. 50. P. 465–492.
- Spiridonov E.M., Kulagov E.A., Serova A.A., Kulikova I.M., Korotaeva N.N., Sereda E.V., Tushentsova I.N., Belykov S.N., Zhukov N.N. Genetic Pd, Pt, Au, Ag, and Rh mineralogy in Noril'sk sulfide ores. *Geol. Ore Deposits*. **2015**. Vol. 57(5). P. 402–432.
- Spiridonov E.M. Genetic model of deposits of the Norilsk ore field. *Smirnov collection-2019*. Moscow: Max Press, **2019**. P. 41–113 (in Russian).
- Spiridonov E.M. Ore-magmatic systems of the Norilsk ore field. *Russian Geol. Geophys.* **2010**. P. 52–79.
- Spiridonov E.M., Belyakov S.N., Korotaeva N.N., Egorov K.V., Ivanova Yu.A., Naumov D.I., Serova A.A. Menshikovite Pd<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>As<sub>3</sub> and associated minerals of sulfide ores on the eastern flank of the Oktyabrskoye deposit, Norilsk ore field. *Moscow Univers. Geol. Bull.* **2020**. N 4. P. 22–29 (in Russian).
- Spiridonov E.M., Golubev V.N., Gritsenko Yu.D. Lead isotopic composition of galena, altaite and palladium intermetallic compounds of sulfide ores of the Norilsk ore field. *Geochem. Int.* **2010**. Vol. 48. P. 815–824.
- Spiridonov E.M., Gritsenko Yu.D. Epigenetic low-grade metamorphism and Co–Ni–Sb–As mineralization in the Norilsk ore field. Moscow: Naychny mir, **2009**. 218 p. (in Russian).
- 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. Miner.* **2016**. Vol. 54. P. 429–452.
- Stepanov V.K., Turovtsev D.M. Multivariate models of copper-nickel deposits of the Norilsk type. *Proc. TsNIGRI*. **1988**. Vol. 223. P. 86–94 (in Russian).
- 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.
- Vaulin L.L., Sukhanova E.N. Oktyabrskoye copper-nickel deposit. *Prospect and protection of mineral resources*. **1970**. N 4. P. 48–51 (in Russian).
- Verryn S.M.C., Merkle R.K.W. Compositional variation of cooperite, braggite, and vysotskite from the Bushveld Complex. *Miner. 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. Miner.* **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. Miner.* **1986**. Vol. 24. P. 329–346.
- Von Gruenewaldt G., Dicks D., de Wet J., Horsch H. PGE mineralization in the western sector of the eastern Bushveld Complex. *Miner. Petrol.* **1990**. Vol. 42. P. 71–95.
- Zolotukhin V.V. About low-temperature metasomatites associated with serpentinization processes in the Norilsk ore-bearing trap intrusions. In: *Geology and petrology of the intrusive traps of the Siberian Platform*. Moscow: Nauka, **1970**. P. 179–186 (in Russian).
- Zolotukhin V.V., Vasiliev Yu.R., Smekalin A.G., Bakumenko I.T. Babingtonite–prehnite–pumpellyite paragenetic association in the Norilsk metasomatites. In: *Mat. on genetic. and experiment. mineralogy. Vol. 5*. Novosibirsk: Nauka, **1967**. P. 218–251 (in Russian).