

УДК 549.514.8-9:551.22(477.75)

**Э.М. Спиридовон<sup>1</sup>, С.Н. Беляков<sup>2</sup>, Н.Н. Коротаева<sup>3</sup>, К.В. Егоров<sup>4</sup>,  
Ю.А. Иванова<sup>5</sup>, Д.И. Наумов<sup>6</sup>, А.А. Серова<sup>7</sup>**

## МЕНЬШИКОВИТ $Pd_3Ni_2As_3$ И АССОЦИИРУЮЩИЕ МИНЕРАЛЫ СУЛЬФИДНЫХ РУД НА ВОСТОЧНОМ ФЛАНГЕ ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (НОРИЛЬСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ)

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1  
Норильский Горно-металлургический комбинат имени А.П. Завенягина, 663310, Норильск, Гвардейская пл., 2*  
*Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1  
Zavenyagin Norilsk Mining and Metallurgical Combine, 663310, Norilsk, Gvardeiskaya pl. 2*

Существенное количество редкого арсенида палладия и никеля — меньшиковита  $Pd_3Ni_2As_3$  установлено на восточном фланге Октябрьского месторождения (Норильское рудное поле), у контакта сплошных и импреняционных сульфидных Co-Ni-Cu руд среди магнетит-плагиоклаз-фассаитовых скарнов. Сульфидный материал тех и других руд — агрегаты халькопирита, пентландита, пирротина, кубанита — продукты субсолидусных превращений высокотемпературных твердых растворов Iss3, Iss4 и подчиненного MSS; с вrostками более позднего Se-галенита. Меньшиковит в ассоциации с мертиитом-II, Ag-золотом (пробность 756–706), Au-электрумом (пробность 694–672), котульским, мончеитом, редкими алтаитом, гесситом, налдреттитом, мелонитом слагает мелкие (до 30 мкм) метасоматические вростки на контакте силикатной матрицы и агрегатов сульфидов. Состав меньшиковита близок к теоретическому —  $(Pd_{2,98}Ru_{0,03})_{3,01}(Ni_{1,89}Fe_{0,08}Co_{0,01})_{1,98}(As_{2,94}Se_{0,04}Bi_{0,02}Sn_{0,01})_{3,01}$ . Метакристаллы сперрилита срезают границы выделений меньшиковита и других минералов благородных металлов и содержат их «изъеденные» включения. Эта ассоциация пневматолитовых минералов благородных металлов возникла при повышенной активности в флюидах As, Te, Sb и Bi и низкой — Sn. Меньшиковит характерен для Октябрьского месторождения, руды которого наиболее богаты Pd. Другой арсенид палладия и никеля — маякит  $PdNiAs$  — относительно широко развит в месторождениях Талнахское и Норильск-1. Возможно, такое распределение арсенидов Pd и Ni — элемент зональности Норильского рудного поля.

**Ключевые слова:** пневматолитовая минерализация, меньшиковит, мертиит-II, котульскит, мончеит, Ag-золото, Au-электрум, Se-галенит, сперрилит, фассаит, пентландит, зональность Норильского рудного поля.

Significant amount of menshikovite (rare palladium and nickel arsenide)  $Pd_3Ni_2As_3$  was found on the Eastern flank of the Oktyabrsky deposit (Norilsk ore field), near the contact of solid and impregnation sulfide Co-Ni-Cu ores among magnetite-plagioclase-fassaite skarns. Sulfide material of both ores consists of chalcopyrite, pentlandite, pyrrhotite and cubanite aggregates, which are the products of subsolidus transformations of high-temperature solid solutions Iss3, Iss4 and subordinate MSS; with interpositions of later Se-galenite. Menshikovite in association with mertieite-II, silver-gold (fineness 756–706), golden-electrum (fineness 694–672), kotulskite, moncheite, rare altaite, hessite, naldrettite and melonite forms small (up to 30 microns) metasomatic growths on the contact of silicate matrix and magmatogenic sulfide aggregates. The average composition of menshikovite is close to theoretical data:  $(Pd_{2,98}Ru_{0,03})_{3,01}(Ni_{1,89}Fe_{0,08}Co_{0,01})_{1,98}(As_{2,94}Se_{0,04}Bi_{0,02}Sn_{0,01})_{3,01}$ . Sperrylite metacrystals cut the borders of menshikovite accretions as well as other minerals of precious metals and contain “corroded” inclusions. This association of minerals of noble metals has arisen under the increased activity of As, Te, Sb, Bi and low activity of Sn in fluids.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: ernstspiridon@gmail.com

<sup>2</sup> Норильск, Норильский ГМК, рудник Октябрьский, ст. геолог; e-mail: belyakovsn@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии и вулканологии, вед. инженер; e-mail: natakorotaeva@yandex.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, студент; e-mail: kirill747@yahoo.com

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, студент; e-mail: yuliaivanova5666@mail.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, студент; e-mail: Nden97@gmail.com

<sup>7</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, аспирант; e-mail: almashkina@mail.ru

Menshikovite is typical for Pd-rich ores of the Oktyabrsky Deposit, while mayakite PdNiAs (another palladium and nickel arsenide) is relatively widely developed in ores of the Talnakh Deposit (Mayak mine and partly Komsomolsky mine) and the Norilsk-I. Perhaps, such a distribution of palladium-nickel arsenides is an element of mineral zonality of the Norilsk ore field.

**Key words:** pneumatolytic mineralization, menshikovite, mertieite-II, kotulskite, moncheite, golden-electrum, Se-galenite, sperrylite, fassaite, pentlandite, zonality of the Norilsk ore field.

**Введение.** Норильское рудное поле — крупнейшее скопление руд Pd. При изучении магматогенных сульфидных Co-Ni-Cu руд, которые содержат метасоматические вrostки минералов благородных металлов — интерметаллидов и близких к ним минералов Pd и Pt и минералов систем Au—Ag и Au—Ag—Cu (Pd, Pt), на восточном фланге месторождения Октябрьское (Талнахский рудный узел) установлено наличие редкого арсенида палладия и никеля — меньшиковита.

**Меньшиковит.** О существенном химическом сродстве палладия и мышьяка свидетельствует то, что из 70 известных палладиевых минералов 16 представлены арсенидами [Бегизов, 1977; Бегизов и др., 1981; Генкин и др., 1976, 1981; Евстигнеева, Генкин, 1990; Naldrett, 2004]. Один из наиболее распространенных — арсенид палладия и никеля — маякит PdNiAs, открытый Т.Л. Евстигнеевой [Генкин и др., 1976].

Известны арсениды палладия пневматолитового генезиса — маякит, продукт замещения первичного пентландита норильских руд [Спиридовон, 2010, 2019; Spiridonov et al., 2015], а также паларстанид  $Pd_5(Sn,As)_2$  [Бегизов и др., 1981], палладоарсенид  $Pd_2As$  и винсентит  $Pd_3As$  метаморфогенно-гидротермального генезиса, замещающие маякит [Spiridonov et al., 2016].

Относительно недавно в магматогенных сульфидных Cu-Ni рудах, обогащенных Pd, в разных регионах — в интрузиве Луккулайсаара (Карелия), Чинейском интрузиве (Восточная Сибирь) и в Норильских рудах был открыт арсенид палладия и никеля, обогащенный палладием, — меньшиковит  $Pd_3Ni_2As_3$  [Barkov et al., 2002]. В дальнейшем в сходной обстановке редкий меньшиковит был установлен в Платрифе Бушвельда [Holwell et al., 2006], в Мончегорском [Гроховская и др., 2009] и Мончегорском интрузивах Кольского п-ова [Grokhovskaya et al., 2014], а также в интрузивном комплексе Колдуэлл в Канаде [Good et al., 2017].

**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 Норильские Ag-Au-Pt-Pd-Co-Ni-Cu месторождения сопряжены с рудоносными интрузивами норильского типа, относящимися к наиболее поздним производным грандиозной сибирской траповой формации, которая возникла на рубеже перми и триаса [Годлевский, 1959; Золотухин и др., 1977; Степанов, 1981; Степанов, Туровцев, 1988; Туровцев, 2002; Arndt et al., 2003; Kamo et al., 2003; Спиридовон,

2010, 2019]. Норильские сульфидные руды сложены продуктами субсолидусных превращений высокотемпературных сульфидных твердых растворов — железо-никелевых MSS1, MSS2 и железо-медно-никелевых ISS1, ISS2, ISS3, ISS4, ISS5 — продуктов кристаллизации остывающих сульфидных расплавов, состав которых прогрессивно обеднялся железом и обогащался медью [Годлевский, 1960; Генкин и др., 1981; Степанов, Туровцев, 1988; Спиридовон, 2010, 2019].

Наиболее богаты Pd, Pt, Au и Ag и их минералами самые поздние существенно медиистые руды, часто содержащие специфические минералы группы халькопирита — талнахит и моихукит; чрезвычайно богаты благородными металлами и их минералами существенно медиистые руды, богатые галенитом [Годлевский, 1959, 1960; Ваулин, Суханова, 1970; Генкин и др., 1981; Степанов, Туровцев, 1988; Изойтко, 1997; Спиридовон, 2010, 2019; Spiridonov et al., 2015]. Таковы сульфидные руды восточного фланга Октябрьского месторождения с меньшиковитом.

**Материалы и методы исследований.** Изучена коллекция сульфидных руд Октябрьского месторождения, отобранных из подземных выработок С.Н. Беляковым и Э.М. Спиридовоном. Электронные фотографии и анализы минералов выполнила Н.Н. Коротаева (микрозондовый комплекс с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ «Jeol JSM-6480 LV», лаборатория локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова) по стандартной методике (в тексте и на рисунках единая сквозная нумерация химических анализов минералов).

**Результаты исследований и их обсуждение.** **Сульфидные руды с меньшиковитом восточного фланга Октябрьского месторождения.** Меньшиковит развит у контакта сплошных и импренационных сульфидных Co-Ni-Cu руд (рис. 1, A) среди мелкозернистых магнетит-плагиоклаз-фасцитовых скарнов. Преобладающий минерал этих скарнов, распространенных на восточном фланге Октябрьского месторождения и на Комсомольском месторождении [Туровцев, 2002], богатый Al клинопироксен — фассаит. Почти безжелезистый фассаит (табл. 1, ан. 1, 2) слагает ядра кристаллов, а умеренно железистый фассаит (табл. 1, ан. 3, 4) — внешние зоны кристаллов. В скарнах широко распространены небольшие кубооктаэдрические кристаллы малотитанистого магнетита с тончайшими пластинками распада ильменита. В отдельных участках скарнов часть фассаита замещена желези-

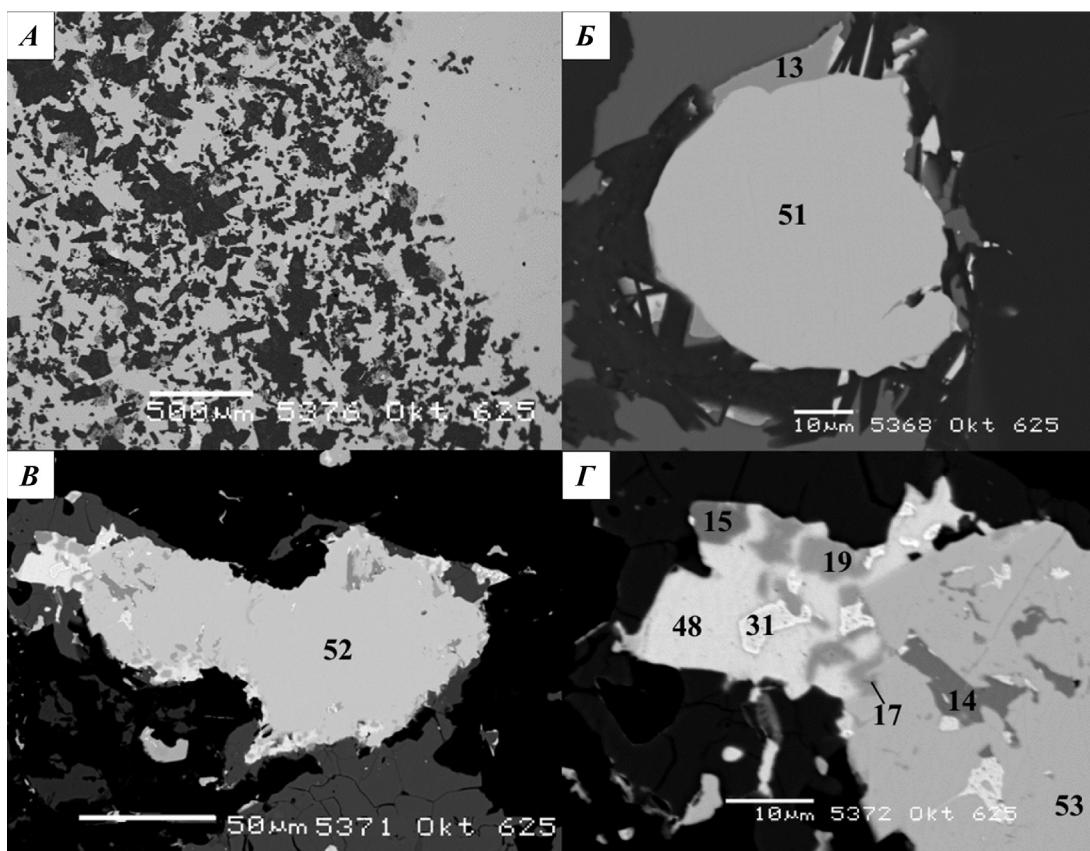


Рис. 1. Восточный фланг Октябрьского месторождения: *А* — контакт сплошных и импренниционных сульфидных руд; *Б* — метасоматические вrostки меньшиковита (светло-серое, ан. 13), котульского (белое) и сперрилита (серовато-белое, ан. 51) на контакте силикатной матрицы (черное) и агрегата халькопирита и пентландита (серое), метакристалл сперрилита срезает границы выделений меньшиковита; *В* — метасоматический вросток сперрилита (светлое, ан. 52) и иных минералов благородных металлов на контакте силикатной матрицы (черное) и срастаний халькопирита, пентландита и пирротина (темно-серое); *Г* — фрагмент фотографии *В*: метакристалл сперрилита (ан. 53) с включениями «изъеденных» меньшиковита (ан. 14) и мертиита-II (ан. 17) срезает выделение Se-галенита (ан. 48) с вростками меньшиковита (ан. 15), мертиита-II (ан. 19), электрума (ан. 31).  
В отраженных электронах

стым хлоритом, а плагиоклаз — гидрогранатом, по составу близким к гидрогроссуляру: анализы 5 и 6 (масс.-%):  $\text{SiO}_2$  35,08 и 38,47;  $\text{TiO}_2$  нпло и 0,14;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  20,69 и 21,26;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  3,52 и 3,96;  $\text{MnO}$  0,32 и 0,17;  $\text{MgO}$  1,12 и 0,17;  $\text{CaO}$  35,38 и 35,96; сумма 96,11 и 100,13%; формулы гидрогроссуляря  $(\text{Ca}_{2,83}\text{Mg}_{0,13}\text{Mn}^{2+}_{0,02}\text{Fe}^{3+}_{0,02})_3(\text{Al}_{1,82}\text{Fe}^{3+}_{0,18})_2[(\text{SiO}_4)_{2,62}(\text{O}_4\text{H}_4)_{0,38}]$  и  $(\text{Ca}_{2,85}\text{Fe}^{3+}_{0,08}\text{Mn}^{2+}_{0,05}\text{Mg}_{0,02})_3(\text{Al}_{1,85}\text{Fe}^{3+}_{0,14}\text{Ti}_{0,01})_2[(\text{SiO}_4)_{2,84}(\text{O}_4\text{H}_4)_{0,16}]$ .

Сульфидный материал сплошных и импренниционных руд — пластинчатые и главным образом зернистые агрегаты халькопирита, пентландита, пирротина, кубанита — продукты субсолидусных превращений высокотемпературных твердых растворов Iss3, Iss4, подчиненного MSS 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, минерал иногда содержит до 0,1–0,2 масс.% Ag.

Состав пентландита довольно устойчив (табл. 2, ан. 7–12). Это стандартный бедный кобальтом (~1 масс.-%) пентландит, с небольшим преобла-

данием никеля над железом, иногда содержащий до 0,5 масс.% меди. В отдельных более крупных выделениях пентландита наблюдаются тончайшие и редкие пластинки распада аргентопентландита. Пирротин устойчивого состава, который близок к  $\text{Fe}_8\text{S}_9$ , содержит в среднем 0,32 масс.% Co и 0,26% Ni ( $n=4$ ). Среди продуктов распада первичных сульфидных твердых растворов, богатых медью, присутствуют мелкие (до 5 мкм) выделения железистого сфалерита, бедного кадмием, и точечные выделения галенита, местами обильные.

**Меньшиковит и ассоциирующие минералы благородных металлов сульфидных руд восточного фланга Октябрьского месторождения.** Меньшиковит  $\text{Pd}_3\text{Ni}_2\text{As}_3$  в ассоциации с мертиитом-II, серебристым золотом, золотистым электрумом, котульским, мончейитом, редкими алтайитом, гесситом, налдретитом, мелонитом слагает мелкие (до 30 мкм) метасоматические вростки на контакте силикатной матрицы и агрегатов магматогенных сульфидов и среди силикатной матрицы. Как правило, меньшиковит развит рядом с пентландитом, за счет вещества которого этот минерал, вероятно, и возник. Обычны срастания меньшиковита с котульским, пересеченные метакристаллами

Таблица 1

**Химический состав (масс.%) фассаита в импренъационных сульфидных рудах с меньшиковитом, Восточный фланг Октябрьского месторождения**

Состав	Номер анализа			
	1	2	3	4
SiO <sub>2</sub>	48,47	46,66	45,32	44,29
TiO <sub>2</sub>	1,04	0,67	1,56	0,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,80	7,37	8,71	8,24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,92	3,71	6,13	8,67
FeO	0,20	—	0,39	2,15
MnO	нпo	нпo	нпo	0,14
MgO	14,80	14,09	12,87	11,03
CaO	25,26	25,10	24,68	24,38
Na <sub>2</sub> O	нпo	нпo	0,16	0,12
Сумма	99,49	97,60	99,82	99,87
Число атомов в формуле в расчете на 4 единицы				
Ca	0,995	1,010	0,983	0,987
Mg	0,811	0,788	0,713	0,621
Fe <sup>3+</sup>	0,081	0,105	0,172	0,247
Fe <sup>2+</sup>	0,006	—	0,012	0,068
Al	0,078	0,078	0,066	0,040
Ti	0,029	0,019	0,044	0,024
Mn	—	—	—	0,005
Na	—	—	0,010	0,008
Сумма	2			
Si	1,783	1,752	1,684	1,673
Al	0,217	0,248	0,316	0,327
Сумма	2			
#Ca	52,6	53,1	52,5	51,5
#Mg	42,8	41,4	37,7	32,2
#Fe	4,6	5,5	9,8	16,3
f	9,7	11,8	20,5	34,0

Примечание. Здесь и далее — нпo — ниже предела обнаружения, количество Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и FeO рассчитано по балансу зарядов; электронный микрозонд; аналитик Н.Н. Коротаева.

сперрилита (рис. 1, *Б*), или вrostки меньшиковита в Se-галените совместно с мертиитом-II и электрумом (рис. 1, *B*, *Г*). Нередки «изъеденные» реликты меньшиковита в метакристаллах сперрилита (рис. 1, *B*, *Г*), здесь меньшиковиту сопутствует мертиит-II. Таким образом, меньшиковит и ассоциирующие котульскит, мертиит-II, золото и электрум — более ранние образования, чем сперрилит. Сперрилит — наиболее поздний из первичных минералов благородных металлов в норильских рудах [Спиридонов, 2010], это образование пятой стадии пневматолитовых минералов благородных металлов в этих рудах [Спиридонов, 2019]. Меньшиковит — более раннее образование, которое, судя по ассоциации с золотом и электрумом, принадлежит к образованиям четвертой стадии пневматолитовых минералов благородных металлов в норильских рудах. Состав меньшиковита достаточно устойчив (табл. 3, ан. 13–16), широко колеблется только содержание элементов-примесей: железа, кобальта, селена и олова.

Таблица 2

**Химический состав (масс.%) пентландита сульфидных руд с меньшиковитом, Восточный фланг Октябрьского месторождения**

Состав	Номер анализа					
	7	8	9	10	11	12
Ni	34,24	34,35	34,16	34,17	33,83	34,03
Fe	31,05	30,70	30,21	30,93	29,61	31,12
Co	1,10	1,11	1,15	1,18	1,20	1,24
Cu	0,42	нпo	нпo	0,36	нпo	нпo
S	33,05	33,22	33,02	33,10	32,91	33,03
Сумма	99,86	99,38	98,78	99,74	97,64	99,42
Число атомов в формуле в расчете на 17 единиц						
Ni	4,516	4,542	4,554	4,510	4,549	4,503
Fe	4,305	4,267	4,233	4,291	4,186	4,329
Co	0,145	0,146	0,153	0,155	0,161	0,163
Cu	0,051	—	—	0,044	—	—
Сумма	9,017	8,956	8,940	9,000	8,896	8,996
S	7,983	8,044	8,060	8,000	8,104	8,004

Примечание. Ag, Se, Pd — не обнаружены; электронный микрозонд; аналитик Н.Н. Коротаева.

Таблица 3

**Химический состав (масс.%) меньшиковита в сульфидных Co-Ni-Cu рудах, Восточный фланг Октябрьского месторождения**

Состав	Номер анализа			
	13	14	15	16
Pd	47,52	47,63	47,40	46,72
Ru	0,54	0,49	0,41	0,53
Ni	16,35	16,75	16,65	16,32
Fe	0,85	1,01	0,11	0,91
Co	0,16	нпo	0,13	нпo
As	31,52	32,73	34,01	33,08
Se	0,70	0,57	нпo	0,55
Bi	0,62	0,66	0,59	0,72
Sn	0,47	нпo	нпo	нпo
Сумма	98,73	99,84	99,30	98,83
Число атомов в формуле в расчете на 8 единиц				
Pd	3,014	2,976	2,984	2,950
Ru	0,036	0,032	0,027	0,035
сумма	3,050	3,008	3,011	2,985
Ni	1,880	1,898	1,901	1,869
Fe	0,103	0,120	0,013	0,109
Co	0,018	—	0,015	—
Сумма	2,001	2,018	1,929	1,978
As	2,842	2,905	3,041	2,967
Se	0,060	0,048	—	0,047
Bi	0,020	0,021	0,019	0,023
Sn	0,027	—	—	—
Сумма	2,949	2,974	3,060	3,037

Примечание. Pt, Rh, Os, Ir, Au, Ag, Cd, Pb не обнаружены; электронный микрозонд; аналитик Н.Н. Коротаева.

Таблица 4

**Химический состав (масс.%) мертиита-II в сульфидных рудах с меньшниковитом, Восточный фланг Октябрьского месторождения**

Состав	Номер анализа		
	17	18	19
Pd	73,34	73,18	71,93
Ru	0,66	0,62	0,56
Sb	20,96	17,05	14,41
As	6,34	8,96	10,17
Sn	0,69	0,52	0,58
Сумма	101,99	100,33	97,65
Число атомов в формуле в расчете на 11 единиц			
Pd	7,91	7,90	7,91
Ru	0,07	0,07	0,06
Сумма	7,98	7,97	7,97
Sb	1,98	1,61	1,38
As	0,97	1,37	1,59
Sn	0,07	0,05	0,06
Сумма	3,02	3,03	3,03

Примечание. Bi, Pt, Rh, Os, Ir, Au, Ag — не обнаружены; электронный микрозонд; аналитик Н.Н. Коротаева.

Вариации состава изученного меньшниковита та-ковы (форм. ед. (apfu), в скобках — среднее): Pd 3,01–2,95 (2,98); Ru 0,03–0,04 (0,03); Ni 1,90–1,87 (1,89); Fe 0,01–0,12 (0,08); Co 0–0,02 (0,01); As 2,84–3,04 (2,94); Se 0–0,06 (0,04); Bi 0,02 (0,02); Sn 0–0,03 (0,01). Средний состав меньшниковита на восточном фланге Октябрьского месторождения отвечает  $(\text{Pd}_{2,98}\text{Ru}_{0,03})_{3,01}(\text{Ni}_{1,89}\text{Fe}_{0,08}\text{Co}_{0,01})_{1,98}(\text{As}_{2,94}\text{Se}_{0,04}\text{Bi}_{0,02}\text{Sn}_{0,01})_{3,01}$ , т.е. близок к теоретическому.

**Мертиит-II**  $\text{Pd}_8(\text{Sb},\text{As})_3$  слагает мелкие (до 15 мкм) вrostки в Se-галените (рис. 1, Г) и обособленные выделения в силикатной матрице импренъационных руд, а также наблюдается в виде «изъеденных» зерен в метакристаллах сперрилита (рис. 1, В). Состав минерала по соотношению сурьмы и мышьяка изменчив (табл. 4, ан. 17–19). Средний состав мертиита-II отвечает  $(\text{Pd}_{7,91}\text{Ru}_{0,07})_{7,98}(\text{Sb}_{1,66}\text{As}_{1,30}\text{Sn}_{0,06})_{3,02}$ , т.е. отношение палладия к сумме сурьмы и мышьяка в описанном минерале близко к теоретическому.

**Золото серебристое и электртум золотистый** — относительно распространенные минералы сплошных и импренъационных сульфидных руд на восточном фланге Октябрьского месторождения, слагают мелкие (до 70 мкм), неправильной формы метасоматические вrostки в сульфидной или в силикатной матрице (рис. 2, А, Б), часто на контакте агрегатов сульфидов и силикатов, а также мелкие метасоматические вrostки в Se-галените (рис. 1, В, Г). В разных выделениях пробность золота варьирует от 756 до 706 (табл. 5, ан. 20–26), пробность электртума варьирует от 694 до 672 (табл. 5, ан. 27–31).

**Котульскит**  $\text{PdTe}$  — наиболее распространенный минерал благородных металлов в описываемых рудах, слагает неправильной формы метасоматические вrostки размером до 90 мкм, которые

Таблица 5

**Химический состав (масс.%) серебристого золота (№ 20–26) и золотистого электртума (№ 27–31) в ассоциации с меньшниковитом, сульфидные руды восточного фланга Октябрьского месторождения**

Номер анализа	Au	Ag	Сумма	Пробность, %
20	76,04	24,52	100,58	756
21	76,02	24,83	100,85	754
22	74,51	25,57	100,08	745
23	73,12	25,53	98,65	741
24	73,70	26,02	99,74	739
25	72,31	26,85	99,16	729
26	70,20	29,18	99,38	706
27	69,84	30,79	100,63	694
28	68,70	31,06	99,76	689
29	68,57	31,13	99,70	688
30	67,32	32,11	99,43	677
31	67,37	33,06	100,43	672

Примечание. Pd, Pt, Cu, Hg не обнаружены; электронный микрозонд; аналитик Н.Н. Коротаева.

обычно развиты на контакте силикатной матрицы и агрегатов халькопирита, пентландита, пирротина (рис. 2, В, Г). Иногда, это россыпь мельчайших (<1 мкм) неправильной формы вростков котульского или котульского, мончеита и алтита, или котульского, алтита, мелонита и гессита, чаще в силикатной матрице. Состав котульского варьирует от безвисмутистого (табл. 6, ан. 32) до в разной степени висмутистого, с соотношением теллура и висмута от 10:4 до 10:7 (табл. 6, ан. 33–39). Котульский содержит микропримеси рутения и родия.

**Мончеит**  $(\text{Pt},\text{Pd})(\text{Te},\text{Bi})_2$  по распространенности уступает котульскому. Мончеит слагает правильные пластины (рис. 2, В) или мелкие неправильной формы уплощенные выделения (рис. 2, Г), включенные в кристаллы котульского; реже обособленные неправильной формы вростки размером до 30 мкм в силикатной или в сульфидной матрице, иногда это россыпь мельчайших (<1 мкм) неправильной формы вростков мончеита и алтита в силикатной матрице. Состав мончеита по соотношению металла и халькогена стехиометричен (табл. 7, ан. 40–45). В составе мончеита соотношение платины и палладия варьируют от 6:1 до 4:1, соотношения теллура и висмута — от 7:1 до 3:1. Отдельные образцы мончеита содержат до 2,1 масс.% Pb, 1,2 масс.% Hg, 0,6 масс.% Se, средний состав мончеита  $(\text{Pt}_{0,86}\text{Pd}_{0,15})_{1,01}(\text{Te}_{1,63}\text{Bi}_{0,34}\text{Pb}_{0,01}\text{Se}_{0,01})_{1,99}$ .

**Налдреттит**  $\text{Pd}_2\text{Sb}$  образует единичные вростки размером до 7–10 мкм в Se-галените. Состав минерала (ан. 46 и 47) в масс.-%: Pd 62,31 и 60,07; Ru 0,41 и 0,32; Sb 18,83 и 17,83; Te 7,47 и 10,41; As 2,32 и нпo; Bi 6,24 и 10,67; Sn 1,84 и нпo; сумма 99,42 и 99,30%. Формулы теллуростого налдреттита с Октябрьского месторождения:  $(\text{Pd}_{2,00}\text{Ru}_{0,01})_{2,01}(\text{Sb}_{0,52}\text{Te}_{0,20}\text{As}_{0,11}\text{Bi}_{0,10}\text{Sn}_{0,06})_{0,99}$  и  $(\text{Pd}_{2,00}\text{Ru}_{0,01})_{2,01}(\text{Sb}_{0,52}\text{Te}_{0,29}\text{Bi}_{0,18})_{0,99}$ .

Таблица 6

Химический состав (масс.%) котульского в сульфидных рудах с меньшиковитом, Восточный фланг Октябрьского месторождения

Состав	Номер анализа							
	32	33	34	35	36	37	38	39
Pd	43,69	40,96	41,02	40,06	40,37	40,40	40,31	40,43
Ru	0,40	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Rh	нпо	нпо	нпо	0,33	нпо	нпо	нпо	нпо
Te	52,55	36,57	34,84	33,91	33,63	33,77	32,89	31,99
Bi	нпо	23,71	24,69	26,5	26,42	26,65	26,84	28,25
Сумма	96,64	101,24	100,55	100,8	100,42	100,82	100,04	100,67
Число атомов в формуле в расчете на 2 единицы								
Pd	0,994	0,981	0,993	0,975	0,986	0,984	0,990	0,992
Ru	0,010	-	-	-	-	-	-	-
Rh	-	-	-	0,008	-	-	=	-
Сумма	1,003	0,981	0,993	0,983	0,986	0,984	0,990	0,992
Te	0,997	0,730	0,703	0,688	0,685	0,686	0,674	0,655
Bi	-	0,289	0,304	0,328	0,329	0,330	0,336	0,353
Сумма	0,997	1,019	1,007	1,017	1,014	1,016	1,010	1,008

Примечание. Pt, Sb, Sn, Pb, Hg, Cd, Se не обнаружены; электронный микрозонд; аналитик Н.Н. Коротаева.

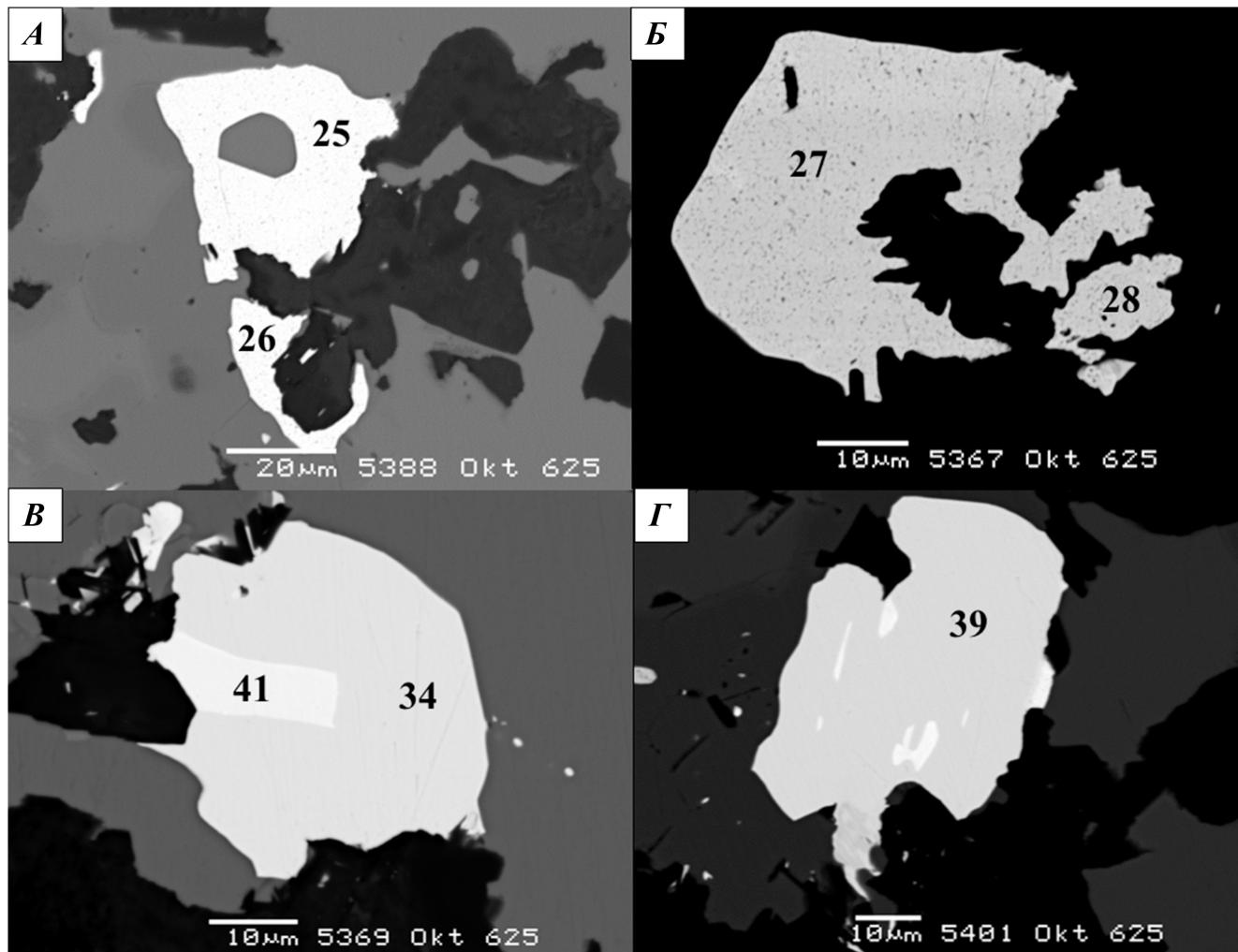


Рис. 2. Восточный фланг Октябрьского месторождения, импренъационные руды: А — метасоматический вросток серебристого золота (ан. 25, 26) в силикатной матрице (черное); Б — метасоматический вросток золотистого электрума (ан. 27, 28) на контакте силикатной матрицы (черное) и агрегата халькопирита, пентландита и пирротина (серое); В — метасоматический вросток котульского (светлое, ан. 34) с включением пластины мончелита (белое, ан. 41) на контакте силикатной матрицы (черное) и агрегата халькопирита и пентландита (серое); Г — метасоматический вросток котульского (ан. 39) с включениями мончелита (белое) в силикатной матрице (черное). Фото в отраженных электронах

Таблица 7

**Химический состав (масс.%) мончейта в сульфидных рудах с меньшиковитом, Восточный фланг Октябрьского месторождения**

Состав	Номер анализа					
	40	41	42	43	44	45
Pt	36,16	37,95	38,8	35,72	35,02	32,56
Pd	3,25	2,19	2,45	3,06	4,30	4,88
Ru	0,33	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Te	47,50	45,12	46,56	45,14	41,80	41,33
Bi	11,48	13,94	13,26	14,35	19,15	20,03
Pb	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	2,07
Hg	нпо	нпо	1,23	1,15	1,06	нпо
Se	0,26	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	98,98	99,20	102,30	99,42	101,33	100,87
Число атомов в формуле в расчете на 3 единицы						
Pt	0,856	0,909	0,918	0,858	0,836	0,779
Pd	0,141	0,105	0,097	0,135	0,188	0,214
Ru	0,015	-	-	-	-	-
Сумма	1,012	1,014	1,016	0,993	1,024	0,993
Te	1,719	1,668	1,669	1,658	1,525	1,512
Bi	0,254	0,290	0,315	0,322	0,427	0,448
Pb	-	-	-	-	-	0,047
Hg	-	0,028	-	0,027	0,025	-
Se	0,015	-	-	-	-	-
Сумма	1,988	1,986	1,984	2,007	1,976	2,007

Примечание. Rh, Sb, Sn не обнаружены; электронный микропрояектор; аналитик Н.Н. Коротаева.

**Se-галенит.** Впервые селенистый галенит в норильских сульфидных рудах описал В.А. Коваленхер [1977]. Небольшие выделения селенистого галенита достаточно многочисленны в описываемых массивных и импреняционных рудах. Минерал содержит 2,2–3,1 масс.% Se, от следов до 1,6 масс.% Tl, от следов до 0,9 масс.% Ag (табл. 8, ан. 48–50).

**Сперрилит  $PtAs_2$**  слагает метакристаллы овальной (рис. 1, Б) и удлиненной формы (рис. 1, В) с поперечником до 150 мкм, границы которых пересекают выделения селенистого галенита, меньшиковита, мертиита-II, мончейта, котульского, золота и электрума. В метакристаллах сперрилита содержатся «изъеденные» включения меньшиковита и мертиита-II (рис. 1, В, Г). Состав сперрилита близок к теоретическому (табл. 9, ан. 51–53). Особенность состава этого сперрилита — примесь селена. Возможно, это обусловлено тем, что сперрилит заместил селенистый галенит.

**Заключение.** В существенном количестве меньшиковит установлен на восточном фланге Октябрьского месторождения (Норильское рудное поле), у контакта сплошных и импреняционных сульфидных Co-Ni-Cu руд, среди магнетит-плагиоклаз-фассаитовых скарнов. Сульфидный материал тех и других руд — агрегаты халькопирита, пентландита, пирротина, кубанита, с вростками более позднего Se-галенита. Меньшиковит в ассоциации

Таблица 8

**Химический состав (масс.%) Se галенита в рудах с меньшиковитом, сульфидные руды восточного фланга Октябрьского месторождения**

Состав	Номер анализа		
	48	49	50
Pb	82,10	83,96	84,29
Ag	0,88	0,65	нпо
Tl	1,58	нпо	нпо
S	12,34	12,05	11,80
Se	2,16	2,82	3,07
Сумма	99,06	99,48	99,16
Число атомов в формуле в расчете на 2 единицы			
Pbt	0,963	0,985	1,000
Ag	0,020	0,015	-
Tl	0,016	-	-
Сумма	0,999	1,000	1,000
S	0,935	0,913	0,905
Se	0,066	0,087	0,095
Сумма	1,001	1,000	1,000

Примечание. Hg, Cd не обнаружены; электронный микропрояектор; аналитик Н.Н. Коротаева.

Таблица 9

**Химический состав (масс.%) сперрилита в рудах с меньшиковитом, сульфидные руды восточного фланга Октябрьского месторождения**

Состав	Номер анализа		
	51	52	53
Pt	55,66	56,24	56,02
Ru	0,48	0,39	0,41
As	42,18	43,05	43,15
Se	0,90	0,80	0,81
Сумма	99,22	100,48	100,39
Число атомов в формуле в расчете на 3 единицы			
Pt	0,990	0,986	0,982
Ru	0,017	0,013	0,014
Сумма	1,007	0,999	0,996
As	1,954	1,966	1,969
Se	0,039	0,035	0,035
Сумма	1,993	2,001	2,004

Примечание. Pd, Rh, Os, Ir, Au, Sn, S — не обнаружены; электронный микропрояектор; аналитик Н.Н. Коротаева.

с мертиитом-II, серебристым золотом, золотистым электротумом, котульским, мончейтом, редкими алтитом, гесситом, налдретитом, мелонитом слагает мелкие метасоматические вростки на контакте силикатной матрицы и агрегатов магматогенных сульфидов и среди силикатной матрицы. Состав меньшиковита близок к теоретическому:  $(Pd_{2,98}Ru_{0,03})_{3,01}(Ni_{1,89}Fe_{0,08}Co_{0,01})_{1,98}(As_{2,94}Se_{0,04}Bi_{0,02}Sn_{0,01})_{3,01}$ . Метакристаллы сперрилита пересекают выделения меньшиковита, мертиита-II, золота, электротума, котульского и мончейта, содержат их «изъеденные» включения.

В большинстве образцов норильских сульфидных руд основные пневматолитовые мине-

ралы палладия — паоловит  $Pd_2Sn$ , атокит  $Pd_3Sn$ , соболевскит  $PdBi$ ; широко развит алтант  $PbTe$ ; из минералов ряда Au—Ag преобладает кюстеллит [Генкин и др., 1981; Евстигнеева, Генкин, 1990; Спиридовон, 2010, 2019; Spiridonov et al., 2015]; эти ассоциации возникли при высокой активности во флюидах Te, Sn, Bi. В описанных выше рудах восточного фланга Октябрьского месторождения паоловит, атокит и соболевскит отсутствуют, из минералов палладия преобладает котульскит  $PdTe$ , количество алтантита небольшое, из минералов ряда Au—Ag преобладает серебристое золото, поскольку заметная часть серебра связана в теллурите —

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бегизов В.Д.** Минералы благородных металлов в рудах Талнахского месторождения: Автореф. канд. дисс. М., МГРИ, 1977.
- Бегизов В.Д., Завьялов Е.Н., Павлов Е.Г.** Паларстанид  $Pd_8(Sn, As)_3$  — новый минерал // Зап. ВМО. 1981. Ч. 110, вып. 4. С. 487–492.
- Ваулин Л.Л., Суханова Е.Н.** Октябрьское медно-никелевое месторождение // Разведка и охрана недр. 1970. № 4. С. 48–51.
- 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., Евстигнеева Т.Л., Тронева Н.В., Вяльсов Л.Н.** Маякит  $PdNiAs$  — новый минерал из медно-никелевых сульфидных руд // Зап. ВМО. 1976. Ч. 105, вып. 6. С. 698–703.
- Годлевский М.Н.** Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 89 с.
- Годлевский М.Н.** Кристаллизационная дифференциация сульфидного расплава на примере Норильских медно-никелевых месторождений // Мат-лы по геологии и полезным ископаемым Сибирской платформы. Л.: ВСЕГЕИ, 1960. С. 95–101.
- Гроховская Т.Л., Лапина М.И., Мохов А.В.** Ассоциации и генезис минералов группы платины в мало-сульфидных рудах Мончегорска, Кольский полуостров, Россия // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 6. С. 520–539.
- Евстигнеева Т.Л., Генкин А.Д.** Платинометальная минерализация норильских медно-никелевых руд: природные и экспериментальные данные // Геология медно-никелевых месторождений СССР. Л., 1990. С. 98–106.
- Золотухин В.В., Рябов В.В., Васильев Ю.Р., Шатков В.А.** Петрология Талнахской рудоносной дифференцированной трапповой интрузии. Новосибирск: Наука, 1975. 434 с.
- Изотико В.М.** Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 582 с.
- Коваленхер В.А.** Минералогия и геохимия Se и Te в медно-никелевых месторождениях Талнахского рудного узла. М.: Наука, 1977. 185 с.
- 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.
- гессите; эта ассоциация минералов благородных металлов возникла при повышенной активности во флюидах As, Te, Sb, Bi и низкой — Sn.
- Меньшиковит  $Pd_3Ni_2As_3$  характерен для Октябрьского месторождения, руды которого максимально обогащены палладием [Ваулин, Суханова, 1970]. Маякит  $PdNiAs$  — другой арсенид Pd и Ni — относительно широко развит на месторождениях Талнахское и Норильск-1. Возможно, такое распределение арсенидов Pd–Ni — элемент зональности Норильского рудного поля.
- Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 19-05-00490).
- Спиридовон Э.М.** Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 52–79.
- Спиридовон Э.М.** Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. М.: Макс Пресс, 2019. С. 41–113.
- Степанов В.К.** Динамическая модель внедрения, кристаллизации и рудоотложения рудоносных интрузий Норильска // Тр. ЦНИГРИ. 1981. Вып. 162. С. 13–19.
- Степанов В.К., Туровцев Д.М.** Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Тр. ЦНИГРИ. 1988. Вып. 223. С. 86–94.
- Туровцев Д.М.** Контактовый метаморфизм Норильских интрузий. М.: Научный мир, 2002. 319 с.
- Arndt N.T., Czamanske G., Walker R.J.** Geochemistry and origin of the intrusivehost of the Noril'sk — Talnakh Cu-Ni-PGE sulphide deposits // Econ. Geol. 2003. Vol. 98. P. 495–515.
- Barkov A.Y., Martin R.F., Pakhomovsky Yu.A.** et al. Menshikovite,  $Pd_3Ni_2As_3$ , a new platinum-group mineral species from two layered complexes, Russia // Canad. Mineral. 2002. Vol. 40. P. 679–692.
- Good D.J., Cabri L.J., Ames D.E.** PGM facies variations for Cu-PGE deposits in the Coldwell Alkaline Complex, Ontario, Canada // Ore Geol. Rev. 2017. Vol. 90. P. 748–771.
- Grokhovskaya T.L., Gribodanova I.G., Karimova O.V.** Diversity of PGM assemblages in deposits of the Monchegorsk Igneous Complex, Russia // 12th Inter. Platinum Symp. Ekaterinburg, 2014. P. 249.
- Holwell D.A., McDonald I., Armitage P.E.B.** Platinum-group mineral assemblages in the Platreef at the South Central Pit., Sandstone mine, northern Bushveld Complex, South Africa // Mineral. Mag. 2006. Vol. 70. P. 83–101.
- Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Yu.** et al. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 214. P. 73–93.
- Naldrett A.J.** Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and explanation. Berlin; Heidelberg; N.Y.: Springer, 2004. 727 p.
- Spiridonov E.M., Kulagov E.A., Serova A.A.** et al. Genetic Pd, Pt, Au, Ag, and Rh mineralogy in Noril'sk sulfide ores // Geol. of Ore Dep. 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.

Поступила в редакцию 30.12.2019

Поступила с доработки 26.02.2020

Принята к публикации 26.02.2020