



ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И СОСТАВА МИНЕРАЛОВ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ВО ВКРАПЛЕННЫХ И МАССИВНЫХ РУДАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, НОРИЛЬСКИЙ РАЙОН

Л.С. КАНИМБУЕ^{1,*}, Н.Д. ТОЛСТЫХ², Н.А. КРИВОЛУЦКАЯ³, И.В. ТАЛОВИНА¹

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»
2, 21 линия В.О., г. Санкт-Петербург 199106, Россия

² ФГБУН «Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева» Сибирского отделения
Российской академии наук
3, пр. Академика Коптюга, г. Новосибирск 630090, Россия

³ ФГБУН «Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского» Российской академии наук
19, ул. Косыгина, г. Москва 119991, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В пределах Октябрьского месторождения Норильского района состав руд и содержащихся в них минералов благородных металлов (МБМ) меняется существенно. Анализ форм нахождения и ассоциаций МБМ позволяет предположить условия их образования в рудах, а изучение их морфологии имеет принципиальное значение для решения технологических вопросов извлечения этих минералов из сульфидной руды.

Цель. Анализ форм нахождения и ассоциаций МБМ для определения их условий образования.

Материалы и методы. В работе изучено 44 аншлифа, полученных из керна скважин, вскрывших центральную часть Октябрьского месторождения. Состав и морфология минералов благородных металлов проанализированы методом сканирующей электронной микроскопии.

Результаты. Изучены формы нахождения МБМ в сульфидных рудах и определена размерность их агрегатов. Выявлены различные парагенезисы МБМ в зависимости от состава сульфидных руд. Получено подтверждение гипотезы о существовании обратной зависимости между температурой кристаллизации МБМ и фугитивностью серы в рудообразующей системе.

Заключение. Состав МБМ и их формы нахождения существенно отличаются в различных типах сульфидных руд центральной части Октябрьского месторождения, что отражает генетические особенности каждого типа оруденения. Выявленные различия в парагенезисах МБМ указывают на отдельную, самостоятельную эволюцию каждой разновидности вкрапленных и массивных руд при разных условиях. Это позволяет актуализировать устоявшуюся модель рудообразования в Октябрьском месторождении.

Ключевые слова: металлы платиновой группы, золото, серебро, медно-никелевые руды, Октябрьское месторождение, морфология минералов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания ИГМ СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Канимбуе Л.С., Толстых Н.Д., Криволицкая Н.А., Таловина И.В. Особенности морфологии и состава минералов благородных металлов во вкрапленных и массивных рудах центральной части Октябрьского месторождения, Норильский район. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2024;66(1):88—98. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-88-98>

Статья поступила в редакцию 06.02.2024
Принята к публикации 15.03.2024
Опубликована 29.04.2024

* Автор, ответственный за переписку

MORPHOLOGICAL FEATURES AND COMPOSITION OF NOBLE METAL MINERALS IN DISSEMINATED AND MASSIVE ORES OF THE CENTRAL PART OF THE OKTYABRSKOE DEPOSIT, NORILSK REGION

LUDMILA S. CANHIMBUE^{1,*}, NADEZHDA D. TOLSTYKH², NADEZHDA A. KRIVOLUTSKAYA³, IRINA V. TALOVINA¹

¹ *Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
2, 21st line, St Petersburg 199106, Russia*

² *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
3, Koptyuga ave., Novosibirsk 630090, Russia*

³ *Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences
19, Kosygina str., Moscow 119991, Russia*

ABSTRACT

Background. The composition of ores and noble metal minerals (NMM) in the Oktyabrskoe deposit of the Norilsk region varies significantly. An analysis of NMM occurrence forms and their associations may elucidate the conditions of their appearance in ores. Research into the morphology of these minerals is of fundamental importance for solving technological issues of their extraction from sulfide ores.

Aim. To analyze the occurrence forms and associations of NMM to determine their formation conditions.

Materials and methods. In total, 44 polished sections obtained from drill-core holes in the central part of the Oktyabrskoe deposit were examined. The composition and morphology of NMM samples were analyzed by scanning electron microscopy.

Results. Forms of NMM in sulphide ores have been studied and the density of their aggregates has been determined. Different NMM paragenesis depending on the composition of sulphide ores was revealed. The hypothesis of the existence of an inverse relationship between the NMM crystallisation temperature and sulphur fugacity in the ore-forming system was confirmed.

Conclusion. In the central part of the Oktyabrskoe deposit, the composition of NMM and their occurrence forms differ significantly depending of the type of sulfide ores and reflecting the genetic features of their mineralization. Differences in NMM paragenesis indicate a separate, independent evolution of each type of disseminated and massive ores under different conditions. This allows us to update the established model of ore formation in the Oktyabrskoe deposit.

Keywords: platinum group metals, gold, silver, copper-nickel ores, Oktyabrskoe deposit, mineral morphology

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: the study was carried out within the framework of the state assignment of IGM SB RAS, financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Canhimbue L.S., Tolstykh N.D., Krivolutsкая N.A., Talovina I.V. Morphological features and composition of noble metal minerals in disseminated and massive ores of the central part of the Oktyabrskoe deposit, Norilsk region. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(1):88–98. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-88-98>

Manuscript received 06 February 2024

Accepted 15 March 2024

Published 29 April 2024

* Corresponding author

Руды месторождений Норильского района являются уникальными по разнообразию присутствующих в них минералов платиновых металлов, золота и серебра.

Особенности распределения минералов платиновой группы (МПГ) в медно-никелевых рудах месторождений Норильского района детально описаны в работах [3, 6, 7, 11, 13, 17, 18] и многих других. В настоящее время здесь идентифицировано более 80 видов МПГ. Вопросы минералогии золота и серебра в норильских рудах изучены в [2, 8, 10, 12, 19 и др.]. Стоит отметить, что в большинстве предыдущих работ благороднометалльная минерализация рассматривается преимущественно в массивных сульфидных и малосульфидных рудах как в наиболее богатых типах, и единичные публикации посвящены изучению минералов благородных металлов (МБМ) во вкрапленных рудах [3, 11, 14, 20]. Это обусловлено редкой встречаемостью этих минералов в данных рудах и мелкими размерами их выделений.

Состав руд и содержащихся в них минералов платиновой группы, золота и серебра меняется существенно не только от месторождения к месторождению, но и в пределах отдельных рудных залежей. В первую очередь это касается самого крупного из них — Октябрьского месторождения, для которого детально охарактеризованы минеральные ассоциации и МПГ основной залежи, но значительно меньше информации имеется для других рудных тел.

Настоящая работа посвящена изучению состава, морфологии и распределения благороднометалльной минерализации в массивных и вкрапленных рудах центральной части Октябрьского месторождения. Анализ форм нахождения и ассоциаций МБМ позволяет предположить условия их образования в рудах, а изучение их морфологии имеет принципиальное значение для решения технологических вопросов извлечения этих минералов из сульфидной руды.

Геологическое строение

Октябрьское месторождение, приуроченное к Хараелахскому дифференцированному интрузиву Норильского рудного района, является уникальным геологическим объектом мирового значения.

Форма и расположение Хараелахского рудоносного интрузива определены сложной тектонической обстановкой, различными типами вмещающих пород и особенностями состава родоначальной магмы (рис. 1).

Интрузив представляет собой пластообразное тело, постепенно погружающееся на северо-восток [6]. В центральной части сверху вниз выделяются следующие горизонты: крупнозернистые лейкогаббро, безоливиновые, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты, пикритовые, такситовые и нижние контактовые габбро-долериты. Октябрьское месторождение локализуется на нижнем контакте Хараелахского интрузива с аргиллитовыми отложениями разведочной свиты девонского возраста и состоит из нескольких рудных тел, являющихся интрузивными ответвлениями [15].

По минеральному составу в центральной части Октябрьского месторождения можно выделить вкрапленные пентландит-халькопирит-пирротиновые и массивные халькопирит-пирротиновые руды залежи С-3 (рис. 16), слагающие Южную ветвь Хараелахского интрузива, а также вкрапленные кубанит-халькопирит-троилитовые руды и массивные кубанит-талнахитовые руды залежи С-4, являющихся частью Северной интрузивной ветви [6].

Методы

Для исследования благороднометалльной минерализации было изучено 44 аншлифа, полученных из керна скважин, вскрывших центральную часть Октябрьского месторождения (рис. 16). Коллекция образцов включала в себя вкрапленные руды пикритовых и такситовых габбро-долеритов и массивные руды.

Состав и морфология минералов благородных металлов проанализированы на сканирующем электронном микроскопе Vega3 фирмы Tescan, оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа Oxford INCA Energy (ВСЕГЕИ, аналитик Грузова Е.Л.), и на сканирующем электронном микроскопе Mira3 Tescan с автоэмиссионным катодом Шоттки (ГЕОХИ РАН, аналитик Демидова С.И.). Анализы проведены при токе 20 нА, ускоряющем напряжении 20 кВ, диаметре пучка 1—3 мкм, время набора спектра от 30 до 50 с.

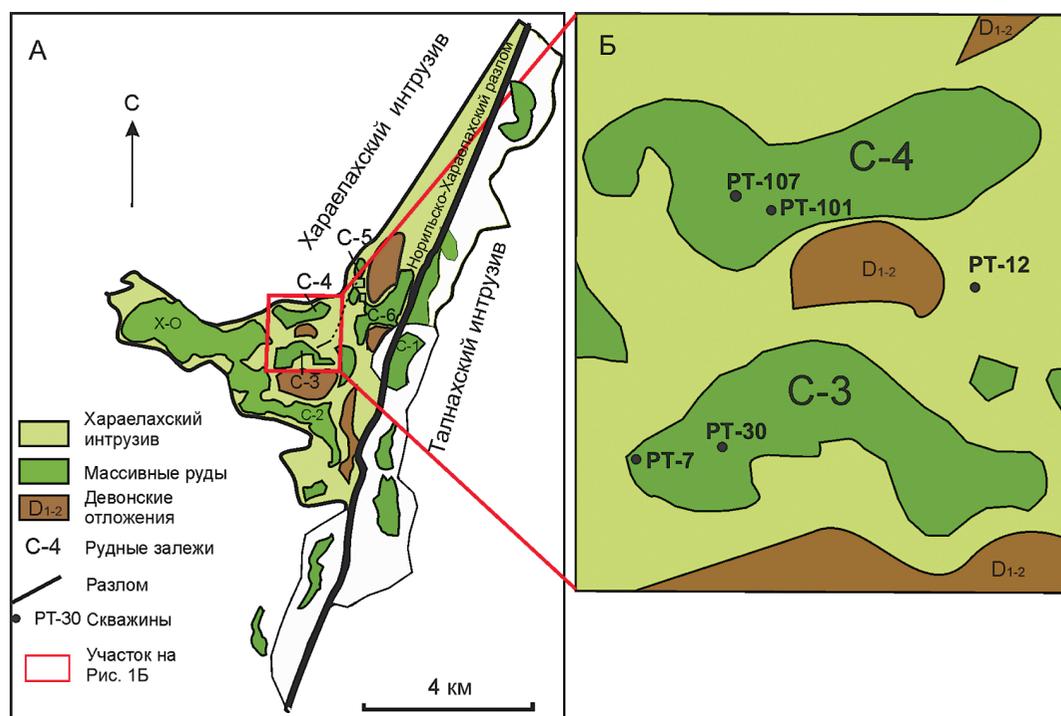


Рис. 1. Проекция интрузивных тел и рудных залежей Талнахского рудного узла на горизонтальную плоскость (А), участок исследований в центральной части Октябрьского месторождения (Б)

Fig. 1. Projection of intrusive bodies and orebodies of the Talnakh ore cluster on a horizontal plane (A), study area in the central part of the Oktyabrskoe deposit (B)

Результаты

Морфология и распределение минеральных агрегатов

Во всех типах сульфидных руд минералы благородных металлов формируют зерна ксеноморфной, угловатой и округлой формы, метакристаллы, микропрожилки, линзовидные выделения, а также тонкие сростания и агрегаты разных по составу и свойствам минералов. Для кристаллов с правильными ограничениями типичны скелетные формы и ступенчатое развитие отдельных граней (рис. 2е). Индивиды МБМ характеризуются однородным внутренним строением, редко отмечается наличие включений сульфидных минералов (рис. 2б). В одном аншлифе могут быть найдены и идиоморфные, и ксеноморфные выделения.

Большая часть идентифицированных зерен (70%) относятся к нано- или микроминералам, имеют крупность 1—10 мкм, при этом максимальный размер изученных зерен составил 100×25 мкм. Как показано во многих работах, распределение минералов платиновых металлов, золота и серебра в сульфидных рудах Октябрьского месторождения крайне неравномерно [2, 3], однако в разрезе Хараелахского интрузива наблюдается увеличение размера зерен МБМ от руд сидеранитовой струк-

турой в оливиновых габбро-долеритах через так называемые «глобулярные» руды в пикритовых габбро-долеритах до руд с ксеноморфной структурой в такситовых габбро-долеритах. Отмечаются скопления МБМ минералов в самой верхней части залежей массивных руд. В основном МБМ ассоциируются с медистыми минералами (халькопирит, кубанит, борнит, талнахит), реже находятся в пентландите, пирротине, миллерите и хлорите.

Состав благороднометалльной минерализации

Отличительной особенностью благороднометалльной минерализации Октябрьского месторождения является широкий спектр элементов в соединениях с ЭПГ, таких как As, Sn, Bi, Te, Sb, Pb, Cu, Se, Ag, Fe [3]. По результатам изучения 44 образцов определено 378 зерна МБМ, среди которых 26 минеральных видов МПГ и 9 минералов золота и серебра.

Кроме того, выявлены различные парагенезисы минералов благородных металлов в зависимости от состава сульфидных руд.

Так, во **вкрапленных пентландит-халькопирит-пирротиновых рудах** Южной ветви Хараелахского интрузива в пикритовых и такситовых габбро-долеритах основного рудного горизонта

(скв. РТ-30, РТ-7, верх РТ-12) преобладают палладиевые и золотосеребряные минералы. Среди первых наиболее распространены соединения палладия с висмутом и теллуrom — котульскит $\text{Pd}(\text{Te}, \text{Bi})_{2-x}$, майченерит PdBiTe , фрудит PdBi_2 , а также арсениды палладия — палладоарсенид Pd_2As , неназванный минерал Pd_5As_2 . Золото и серебро образуют сплавы с содержанием Au от 32 до 62 мас.%. Кроме этого, присутствуют сперрилит PtAs_2 , паоловит Pd_2Sn , рустенбургит $(\text{Pt}, \text{Pd})_3\text{Sn}$. Менее распространены стибнопалладинит Pd_5Sb_2 , служеникинит $\text{Pd}_{15}(\text{Sb}_{7-x}\text{Sn}_x)$, мертиит $\text{Pd}_8\text{Sb}_{2.5}\text{As}_{0.5}$ и куперит PtS . Почти постоянно МПГ ассоциируются с минералами золота и серебра, располагающимися по периферии выделений МПГ и образующими с ними графические сростания (рис. 2а).

Вкрапленные кубанит-халькопирит-троилитовые руды в пикритовых и такситовых габбро-долеритах Северной ветви Хараелахского интрузива (скв. РТ-107, РТ-101, низ РТ-12) характеризуются широким распространением минералов золота и серебра (рис. 2д). Среди них определены электрум с содержанием золота от 36 до 46 мас.%, кюстелит, самородное серебро с примесью палладия до 3 мас.%, аурикуприд Cu_3Au , гессит Ag_2Te , сопчеит $\text{Ag}_4\text{Pd}_3\text{Te}_4$ и аргенто-

пентландит $\text{Ag}(\text{Fe}, \text{Ni})_8\text{S}_8$ с содержанием серебра до 13 мас.%.
 Особенностью кубанит-халькопирит-троилитовых руд является широкое развитие тройных соединений Pd, Sn и Cu, среди которых кабриит Pd_2CuSn и таймырит $(\text{Pd}, \text{Cu}, \text{Pt})_3\text{Sn}$. Также присутствуют паоловит Pd_2Sn , содержащий примесь Pb до 2%, нильсенит PdCu_3 , ниглиит PtSn и серия составов атоakit-рустенбургит $(\text{Pd}, \text{Pt})_3\text{Sn}$ со значительной примесью Au (до 5,77 мас.%). Диагностирован широкий набор теллуридов и висмутидов, включающий мончеит $\text{Pt}(\text{Te}, \text{Bi})_2$, соболевскит PdBi , котульскит $\text{Pd}(\text{Te}, \text{Bi})_{2-x}$, а также не идентифицированные фазы составов: $(\text{Pd}, \text{Pt})_2\text{BiTe}$, $(\text{Pt}, \text{Pd})_2\text{BiTe}_2$, $(\text{Pt}, \text{Pd})_3(\text{Te}, \text{Bi})_5$, $\text{Pd}_7(\text{Bi}, \text{Te})_8$. Встречаются плюмбид палладия звягинцевит Pd_3Pb , арсениды (палладоарсенид Pd_2As , стиллуотерит Pd_8As_3 , фаза Pd_5As_2), мертиит $\text{Pd}_8\text{Sb}_{2.5}\text{As}_{0.5}$. Найдены единичные зерна сперрилита PtAs_2 , изоферроплатины Pt_3Fe и кейтконнит $\text{Pd}_{20}\text{Te}_7$.

В массивных пентландит-халькопирит-пирротиновых рудах залежи С-3 Южной ветви Хараелахского интрузива платинометаллическая минерализация представлена в основном сперрилитом PtAs_2 и паоловитом Pd_2Sn (рис. 3а). Здесь сперрилит не формирует привычные

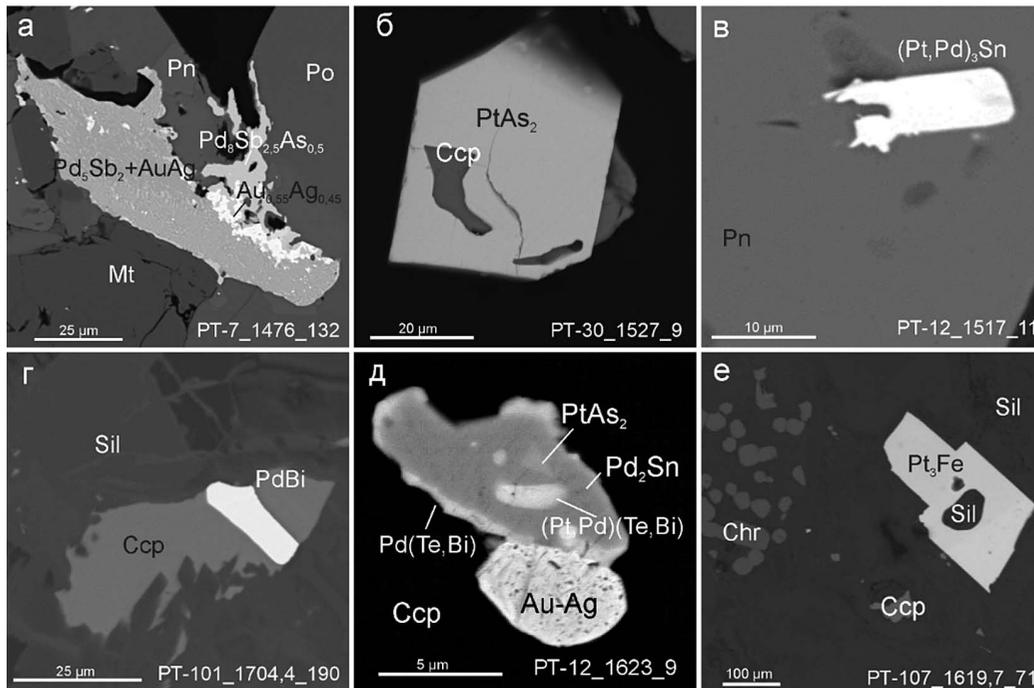


Рис. 2. Морфология минералов благородных металлов во вкрапленных рудах центральной части Октябрьского месторождения: а—в — пентландит-халькопирит-пирротиновые руды; г—е — кубанит-халькопирит-троилитовые руды

Fig. 2. Morphology of noble metal minerals in disseminated ores of the central part of the Oktyabrskoe deposit: а—в — pentlandite-chalcocopyrite-pyrrhotite ores; г—е — cubanite-chalcocopyrite-troilite ores

метакристаллы, а присутствует в виде мелких выделений неправильной и дендритовидной формы, в составе которых стабильно отмечается примесь Sb до 2,21% (рис. 3б). Реже встречаются мончеит $Pt(Te, Bi)_2$, котульскит $Pd(Te, Bi)_{2-x}$, соболевскит $PdBi$, куперит PtS (рис. 3в), минералы ряда атоцит-рустенбургит $(Pd, Pt)_3Sn$, мертиит $Pd_8Sb_{2,5}As_{0,5}$ и надреттит Pd_2Sb . Золото и серебро образуют сплавы с содержанием Au от 32 до 62 мас.%, найдены зерна высокопробного золота. Серебро также присутствует в виде гессита, аргентопентландита и в качестве примеси в халькопирите до 6 мас.%

Массивные кубанит-талнахитовые руды залежи С-4 Северной ветви Хараелахского интрузива имеют наиболее простой из изученных составов благороднометалльной минерализации (рис. 4). В основном она представлена зернами теллуридов палладия и серебра — теларгпалитом $(Pd, Ag)_3Te$ (рис. 3е), в котором часто встречается примесь свинца до 12 мас.%. Кроме того, присутствуют фаза $Pd(Te, Bi)$, таймырит $(Pd, Cu, Pt)_3Sn$, а также единичные выделения палладоарсенида Pd_2As и кейтконнита $Pd_{20}Te_7$. Широко распространены минералы золота и серебра, в основном в виде электрума, золотосодержащего серебра и самородного золота (рис. 3г, д).

Стоит подчеркнуть следующие особенности состава некоторых МПГ. В котульските из вкрапленных пентландит-пирротин-халькопиритовых руд отмечается примесь Sb до 1,86 мас.%, в то время как остальных рудах примеси в котульските отсутствуют. В сперрилите из массивных пентландит-халькопирит-пирротиновых руд стабильно отмечается примесь Sb от 0,6 до 5,8 мас.%, тогда как во вкрапленных кубанит-халькопирит-троилитовых рудах в этом минерале присутствует 2,2—2,7 мас.% Sn. Во вкрапленных пентландит-пирротин-халькопиритовых рудах сперрилит не содержит примесей, а в массивных кубанит-талнахитовых рудах вовсе отсутствует.

Таким образом, состав МБМ и их формы нахождения существенно отличаются в различных типах сульфидных руд центральной части Октябрьского месторождения, характеризую особенности рудоформирующей системы. Распределение минералов платиновых металлов, золота и серебра в рудах наглядно показано на рисунке 4.

Обсуждение

Как известно, морфология, размер и характер сростаний, а также особенности состава минералов благородных металлов зависят от их

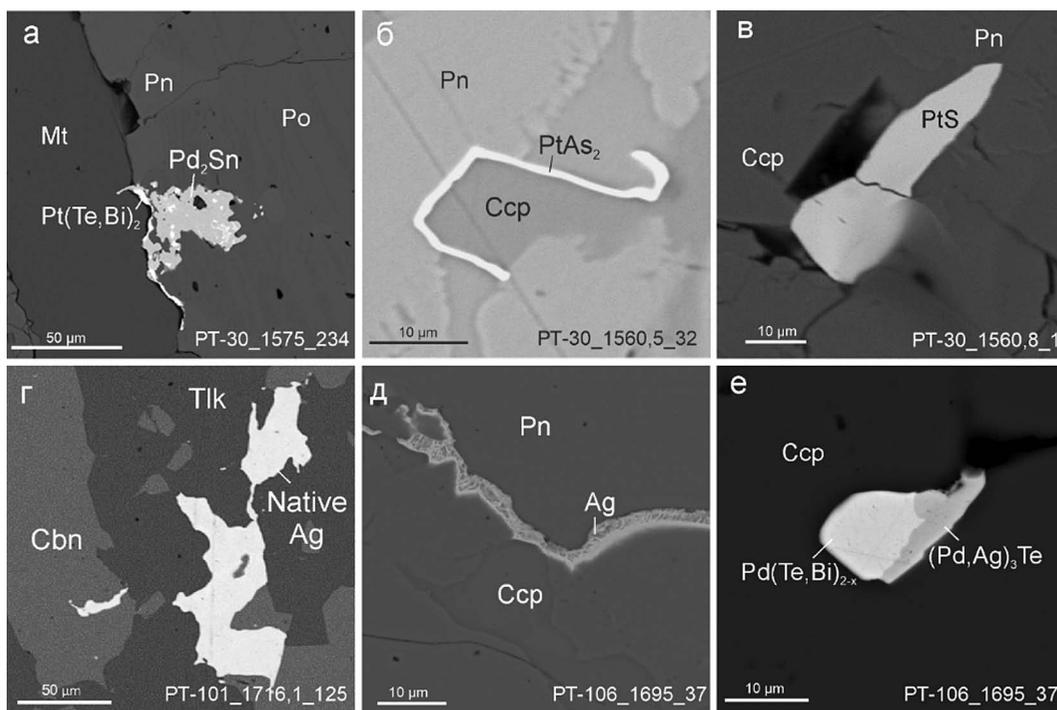


Рис. 3. Морфология минералов благородных металлов в массивных рудах центральной части Октябрьского месторождения: а—в — пентландит-халькопирит-пирротиновые руды; г—е — кубанит-талнахитовые руды
Fig. 3. Morphology of noble metal minerals in massive ores of the central part of the Oktyabrskoe deposit: а—в — pentlandite-chalcopyrite-pyrrhotite ores; г—е — cubanite-talnakhite ores

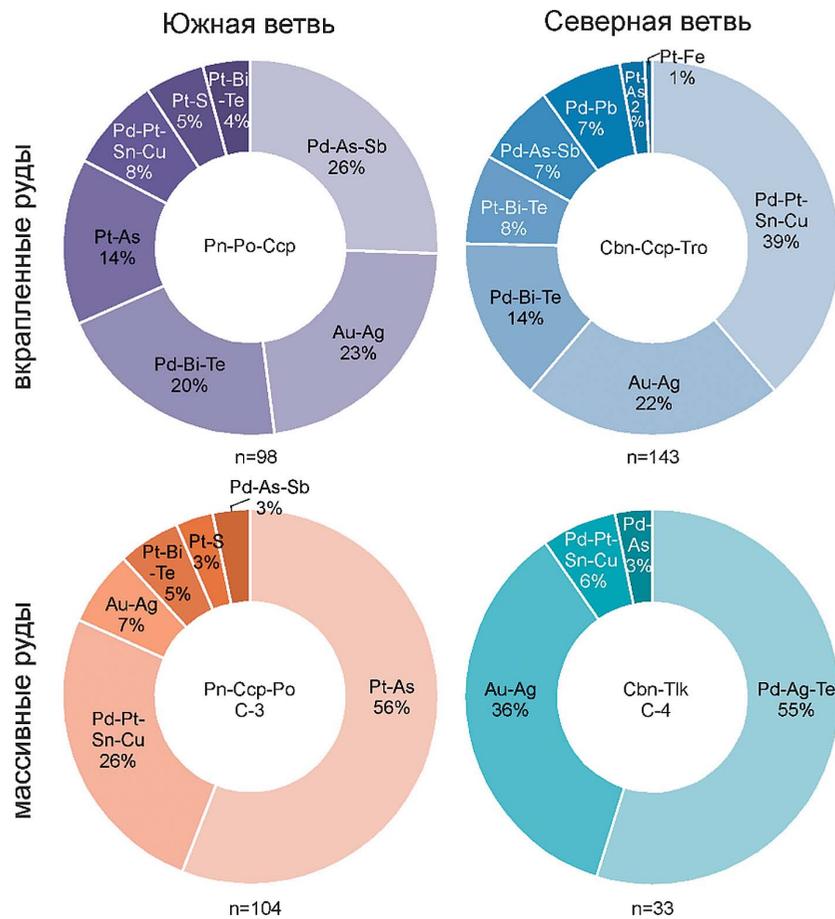


Рис. 4. Диаграммы валового состава благороднометалльной минерализации в рудах центральной части Октябрьского месторождения (n — количество изученных зерен МБМ)

Fig. 4. Diagrams of the bulk composition of noble-metal mineralization in the ores of the central part of the Oktyabrskoe deposit (n — number of studied MBM grains)

концентрации, соотношения и сопровождающих их элементов в породообразующей магме, а также от условий ее кристаллизации [4].

Оценка крупности и частоты встречаемости МБМ по методике [1] показала, что благороднометалльная минерализация представлена преимущественно мелкими зернами станнидов, висмутидов и теллуридов палладия, арсенидов платины, золотосеребряными сплавами, а также редкими крупными сульфидами платины и арсенидами палладия. На рисунке 5 фигуративные точки этих минералов формируют тренд, отражающий отрицательную корреляцию крупности их выделений и частоты встречаемости.

Согласно предыдущим исследованиям [4; 11, 16], концентрация благородных металлов зависит от особенностей эволюции состава каждого типа руд. В частности, во вкрапленных рудах содержание БМ находится в зависимости от содержания серы, в то время как в массивных рудах

важнейшую роль играет степень фракционирования сульфидного вещества.

Ранее [5; 9] нами было установлено, что эволюция фугитивности серы значительно отличалась в горизонтах вкрапленных руд в пикритовых габбро-долеритах разных ветвей Хараелахского интрузива. Так, в Северной ветви отмечается понижение f_{S_2} от $-10,5$ до -13 вниз по разрезу пикритовых габбро-долеритов, что обеспечивало образование низкосернистой сульфидной ассоциации, в данном случае вкрапленных кубанит-халькопирит-троилитовых руд. В Южной ветви, наоборот, от кровли к подошве пикритовых габбро-долеритов наблюдается увеличение фугитивности серы от -13 до -10 , что способствует развитию высокосернистой ассоциации — вкрапленных пентландит-пирротин-халькопиритовых руд.

Наши результаты подтверждают ранее высказанные выводы [21] о существовании обратной зависимости между температурой

кристаллизации МПГ и фугитивностью серы в рудообразующей системе. В кубанит-халькопирит-троилитовых рудах широко развиты высокотемпературные соединения системы Pd-Pt-Sn-Cu (~480—500 °С), считающиеся наиболее ранними минералами руд Октябрьского месторождения [2, 18]. В пентландит-пирротин-халькопиритовых рудах доминируют более низкотемпературные ассоциации арсенидов и висмутидов-теллуридов палладия, формирующихся в интервале ~ 290—350 °С [2, 16].

Массивные руды являются результатом длительной эволюции магматического расплава в промежуточной камере [2, 11] и внедрения его различных фракций в виде отдельных порций. Пентландит-халькопирит-пирротиновые руды залежи С-3 Южной ветви менее фракционированы, чем кубанит-талнахитовые руды залежи С-4 Северной ветви. При этом в них преобладают высокотемпературные минералы, преимущественно, соединения платины (рис. 4). В массивных кубанит-талнахитовых рудах, характеризующихся наиболее высокой степенью фракционирования, наиболее распространены низкотемпературные парагенезисы МБМ. Следовательно, существует обратная зависимость температурного градиента образования МБМ от степени фракционирования массивных руд.

Выводы

Таким образом, выявленные различия в концентрации благородных металлов во вкрапленных и массивных рудах, а также различные парагенезисы минералов благородных металлов внутри единой интрузивной ветви подтверждают гипотезу о независимом, последовательном

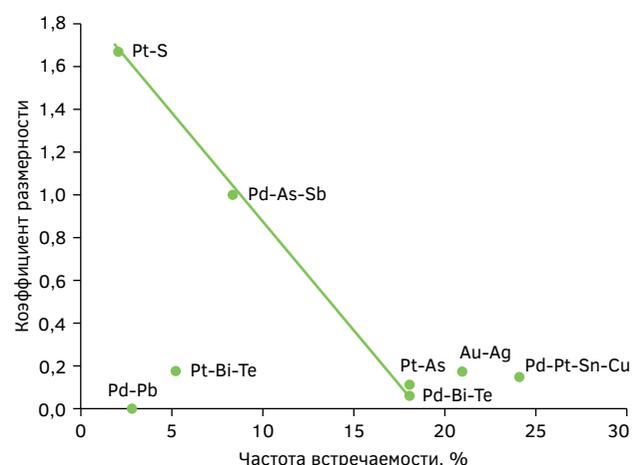


Рис. 5. Частота встречаемости и показатель размерности МБМ центральной части Октябрьского месторождения. Коэффициент размерности равен отношению числа зерен фракции +20 мкм к числу зерен фракции — 20 мкм

Fig. 5. Frequency of occurrence and dimensionality index of MBM of the central part of the Oktyabrskoe deposit. The dimensionality coefficient is equal to the ratio of the number of grains of the +20 μm fraction to the number of grains of the -20 μm fraction

формированию вкрапленного и массивного оруденения в Хараелахской интрузии. Состав МБМ и их формы нахождения существенно отличаются в различных типах сульфидных руд центральной части Октябрьского месторождения, что отражает генетические особенности каждого типа оруденения. Частоты встречаемости МБМ отрицательно коррелируют с крупностью их выделений. Различия в парагенезисах МБМ указывают на отдельную, самостоятельную эволюцию каждого типа вкрапленных и массивных руд при разных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабонин Н.Л., Корчагин А.У., Субботин В.В., Нерадовский Ю.Н., Карпов С.М., Пахомовский Я.А., Савченко Е.Э. Минералы платиновых металлов и новые данные о главных минералах руд Федорово-Панского массива // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2000. Т. 3. №. 2. С. 179—204.
2. Генкин А.Д., Дистлер В.В., Гладышев Г.Д., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л., Коваленкер В.А. и др. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 239 с.
3. Генкин А.Д. Минералы платиновых металлов и их ассоциации в медно-никелевых рудах Норильского месторождения. М.: Наука, 1968. 106 с.
4. Евстигнеева Т.Л., Генкин А.Д. Платино-никелевая минерализация норильских медно-никелевых руд: природные и экспериментальные данные // Геология медно-никелевых месторождений СССР. Сборник научных трудов / Под ред Г.И. Горбунова. М.: Наука, 1990. С. 98—105.
5. Криволицкая Н.А., Толстых Н.Д., Канимбуге Л.С., Гонгальский Б.И., Кузьмин Д.В. Новые данные о геологическом строении Октябрьского месторождения, Норильский рудный район // Ультрамафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: мат-лы VIII Всеросс. конф. с междунар. участием. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2023. С. 109—111.
6. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 495 с.
7. Петров Д.А., Рыжкова С.О., Гембицкая И.М. Редкие минералы благородных металлов в коллекции Горного музея: новые данные // Записки Горного

- института. 2022. Т. 255. С. 493—500. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.42>
8. Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А., Куликова И.М., Коротаева Н.Н., Середа Е.В. и др. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. №. 5. С. 445—476. <https://doi.org/10.7868/S0016777015050068>
 9. Толстых Н.Д., Кривоуцкая Н.А., Канимбуе Л.С., Гонгальский Б.И. Минералого-геохимические особенности руд центральной части Октябрьского месторождения, Норильский рудный район // Мат-лы конф. «Минералообразующие системы месторождений высокотехнологических минералов: достижения и перспективы исследований». М.: ИГЕМ РАН, 2023. С. 386—389.
 10. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation // Minerals. 2023. Vol. 13. No. 1. P. 84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>
 11. Distler V.V., Sluzhenikin S.F., Cabri L.J., Krivolutskaya N.A., Turovtsev D.M., Golovanova T.A., et al. Platinum ores of the Noril'sk layered intrusions: magmatic and fluid concentration of noble metals. // Geol Ore Depos. 1999. Vol. 41. P. 214—237.
 12. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., et al. Studying the Flotation of Gold-Bearing Ores Using Carrier Minerals // Minerals. 2024. Vol. 14. №. 1. P. 88. <https://doi.org/10.3390/min14010088>
 13. Genkin A.D., Evstigneeva T.L. Associations of Platinum-Group Minerals of the Noril'sk Copper-Nickel Sulphide Ores // Econ. Geol. 1986. No. 81 P. 1203—1212.
 14. Komarova M.Z., Kozyrev S.M., Simonov O.N., Lyul'ko V.A. The PGE mineralization of disseminated sulphide ores of the Noril'sk-Taimyr Region // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements. Special volume 54 / Eds. L.J. Cabri. Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002. P. 547—567.
 15. Krivolutskaya, N.A., Gongalsky, B.I., Kedrovskaya, T.B., Kubrakova, I.V., Tyutyunnik, O.A., Chikatueva, V.Y., et al. Geology of the Western Flanks of the Oktyabr'skoe Deposit, Noril'sk District, Russia: Evidence of a Closed Magmatic System // Mineralium Deposita 2019. Vol. 54. P. 611—630. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0827-z>
 16. Makovicky E. Ternary and quaternary phase system with PGE / Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements. Special volume 54 / Eds. L.J. Cabri. Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002. P. 131—176
 17. Mansur E.T., Barnes S.J., Duran C.J., Sluzhenikin S.F. Distribution of chalcophile and platinum-group elements among pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite and cubanite from the Noril'sk-Talnakh ores: Implications for the formation of platinum-group minerals // Mineralium Deposita. 2020. Vol. 55. P. 1215—1232. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00926-z>
 18. Sluzhenikin S.F. Platinum-Copper-Nickel and Platinum Ores of Noril'sk Region and Their Ore Mineralization // Russ. J. Gen. Chem. 2011. Vol. 81. P. 1288—1301. <https://doi.org/10.1134/S1070363211060351>
 19. Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. Gold and silver in PGE-Cu-Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia // Mineralium Deposita. 2015. Vol. 50. P. 465—492. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0543-2>
 20. Sinyakova E., Kosyakov V., Palyanova G., Karmanov N. Experimental modeling of noble and chalcophile elements fractionation during solidification of Cu-Fe-Ni-S melt // Minerals. 2019. Vol. 9. №. 9. P. 531. <https://doi.org/10.3390/min9090531>
 21. Tolstykh N., Garcia J., Shvedov G. Distribution of sulfides and PGE minerals in the picritic and taxitic gabbro-dolerites of the Noril'sk 1 intrusion // The Canadian Mineralogist. 2021. Vol. 59. №. 6. P. 1437—1451. <https://doi.org/10.3749/canmin.2100037>

REFERENCES

1. Balabonin N.L., Korchagin A.U., Subbotin V.V., Neradovsky Yu.N., Karpov S.M., Pahomovsky Ya.A., Savchenko E.E. Platinum metal minerals and new data on the main ore minerals of the Fedorovo-Pan massif. Bulletin of Murmansk State Technical University. 2000. Vol. 3. №. 2. P. 179—204 (In Russian).
2. Genkin A.D., Distler V.V., Gladyshev G.D., Filimonova A.A., Evstigneeva T.L., Kovalenker V.A., et al. Sulfide copper-nickel ores of Noril'sk deposits. Moscow: Nauka, 1981. 239 p. (In Russian).
3. Genkin A.D. Minerals of platinum metals and their associations in copper-nickel ores of the Noril'sk deposit. Moscow: Nauka, 1968. 106 p. (In Russian).
4. Evstigneeva T.L., Genkin A.D. Platinum-metal mineralization of Noril'sk copper-nickel ores: natural and experimental data // Geology of copper-nickel deposits of the USSR. Collection of scientific papers / Ed. G.I. Gorbunov. Moscow: Nauka, 1990. P. 98—105 (In Russian).
5. Krivolutskaya N.A., Tolstykh N.D., Canhimbuе L.S., Gongalsky B.I., Kuzmin D.V. New data on the geological structure of the Oktyabr'skoe deposit, Noril'sk ore district // Ultramafic-mafic complexes: geology, structure, ore potential: Proceedings of the VIII All-Russian Conf. with international participation. Novosibirsk: IPC NSU, 2023. P. 109—111 (In Russian).
6. Likhachev A.P. Platinum-copper-nickel and platinum deposits. Moscow: Eslan, 2006. 495 p. (In Russian).
7. Petrov D.A., Ryzhkova S.O., Gembitskaya I.M. Rare minerals of noble metals in the collection of the

- Mining Museum: new data // Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 255. P. 493—500. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.42>
8. Spiridonov E.M., Kulagov E.A., Serova A.A., Kulikova I.M., Korotaeva N.N., Sereda E.V., et al. Genetic mineralogy of Pd, Pt, Au, Ag, Rh in Norilsk sulfide ores // Geology of ore deposits. 2015. Vol. 57. №. 5. P. 445—476 (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0016777015050068>
 9. Tolstykh N.D., Krivolutskaya N.A., Canhimbue L.S., Gongalsky B.I. Mineralogical and geochemical features of ores of the central part of the Oktyabr'skoe deposit, Norilsk ore district // Proceedings of the conference «Mineral-forming systems of high-tech mineral deposits: achievements and prospects of research». Moscow: IGEM RAS, 2023. P. 386—389 (In Russian).
 10. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation // Minerals. 2023. Vol. 13. No. 1. P. 84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>
 11. Distler V.V., Sluzhenikin S.F., Cabri L.J., Krivolutskaya N.A., Turovtsev D.M., Golovanova T.A., et al. Platinum ores of the Noril'sk layered intrusions: magmatic and fluid concentration of noble metals. // Geol Ore Depos. 1999. Vol. 41. P. 214—237.
 12. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., et al. Studying the Flotation of Gold-Bearing Ores Using Carrier Minerals // Minerals. 2024. Vol. 14. №. 1. P. 88. <https://doi.org/10.3390/min14010088>
 13. Genkin A.D., Evstigneeva T.L. Associations of Platinum-Group Minerals of the Noril'sk Copper-Nickel Sulfide Ores // Econ. Geol. 1986. No. 81 P. 1203—1212.
 14. Komarova M.Z., Kozyrev S.M., Simonov O.N., Lyul'ko V.A. The PGE mineralization of disseminated sulphide ores of the Noril'sk-Taimyr Region // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements. Special volume 54 / Eds. L.J. Cabri. Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002. P. 547—567.
 15. Krivolutskaya, N.A., Gongalsky, B.I., Kedrovskaya, T.B., Kubrakova, I.V., Tyutyunnik, O.A., Chikatueva, V.Y., et al. Geology of the Western Flanks of the Oktyabr'skoe Deposit, Noril'sk District, Russia: Evidence of a Closed Magmatic System // Mineralium Deposita 2019. Vol. 54. P. 611—630. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0827-z>
 16. Makovicky E. Ternary and quaternary phase system with PGE / Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements. Special volume 54 / Eds. L.J. Cabri. Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002. P. 131—176
 17. Mansur E.T., Barnes S.J., Duran C.J., Sluzhenikin S.F. Distribution of chalcophile and platinum-group elements among pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite and cubanite from the Noril'sk-Talnakh ores: Implications for the formation of platinum-group minerals // Mineralium Deposita. 2020. Vol. 55. P. 1215—1232. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00926-z>
 18. Sluzhenikin S.F. Platinum-Copper-Nickel and Platinum Ores of Noril'sk Region and Their Ore Mineralization // Russ. J. Gen. Chem. 2011. Vol. 81. P. 1288—1301. <https://doi.org/10.1134/S1070363211060351>
 19. Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. Gold and silver in PGE-Cu-Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia // Mineralium Deposita. 2015. Vol. 50. P. 465—492. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0543-2>
 20. Sinyakova E., Kosyakov V., Palyanova G., Karmanov N. Experimental modeling of noble and chalcophile elements fractionation during solidification of Cu-Fe-Ni-S melt // Minerals. 2019. Vol. 9. №. 9. P. 531. <https://doi.org/10.3390/min9090531>
 21. Tolstykh N., Garcia J., Shvedov G. Distribution of sulfides and PGE minerals in the picritic and taxitic gabbro-dolerites of the Norilsk 1 intrusion // The Canadian Mineralogist. 2021. Vol. 59. №. 6. P. 1437—1451. <https://doi.org/10.3749/canmin.2100037>

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Канимбуге Л.С. — внесла вклад в подготовку статьи, провела исследования аншлифов методом электронной микроскопии, подготовила текст статьи и рисунки, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Толстых Н.Д. — внесла вклад в разработку концепции статьи, провела исследования аншлифов методом сканирующей электронной микроскопии, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ludmila S. Canhimbue — contributed to the preparation of the article, carried out studies of samples by scanning electron microscopy, prepared the text of the article and figures, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Nadezhda D. Tolstykh — contributed to the development of the concept of the article, conducted studies of the samples by scanning electron microscopy, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Криволицкая Н.А. — внесла вклад в разработку концепции статьи, отобрала и подготовила каменный материал, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Таловина И.В. — внесла вклад в разработку концепции статьи, отредактировала текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Nadezhda A. Krivolutskaya — contributed to the development of the concept of the article, collected and prepared samples, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Irina V. Talovina — contributed to the development of the concept of the article, edited the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Канимбue Людмила Салете* — аспирант кафедры исторической и динамической геологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

2, 21 линия В.О., г. Санкт-Петербург 199106, Россия
e-mail: ludmilacanhimbue@mail.ru
тел.: +7 (925) 377-60-85
SPIN-код: 5438-9589
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0605-5833>

Ludmila S. Canhimbue* — post-graduate researcher of the Department of Historical and Dynamic Geology, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University.

2, 21 line, St. Petersburg 199106, Russia
e-mail: ludmilacanhimbue@mail.ru
tel.: +7 (925) 377-60-85
SPIN-code: 5438-9589
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0605-5833>

Толстых Надежда Дмитриевна — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории петрологии и рудоносности магматических формаций ФГБУН «Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева» Сибирского отделения Российской академии наук.

3, пр. Академика Коптюга, г. Новосибирск 630090, Россия
e-mail: tolst@igm.nsc.ru
SPIN-код: 2625-9030
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4404-899X>

Nadezhda D. Tolstykh — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Leading Researcher of the Laboratory of Petrology and Ore-Bearing of Magmatic Formations, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: tolst@igm.nsc.ru
SPIN-code: 2625-9030
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4404-899X>

Криволицкая Надежда Александровна — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории магматических и метаморфических пород Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук.

19, ул. Косыгина, г. Москва 119991, Россия
e-mail: nakriv@mail.ru
SPIN-код: 6088-7944
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5709-7785>

Nadezhda A. Krivolutskaya — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Leading Researcher of the Laboratory of Magmatic and Metamorphic rocks, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences.

19, Kosygina str., Moscow 119991, Russia
e-mail: nakriv@mail.ru
SPIN-code: 6088-7944
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5709-7785>

Таловина Ирина Владимировна — доктор геолого-минералогических наук, заведующая кафедрой исторической и динамической геологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

2, 21 линия В.О., г. Санкт-Петербург 199106, Россия
e-mail: talovina_iv@pers.spmi.ru
SPIN-код: 7304-0991
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4132-7010>

Irina V. Talovina — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Head of the Department of Historical and Dynamic Geology, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University.

2, 21 line, St. Petersburg 199106, Russia
e-mail: talovina_iv@pers.spmi.ru
SPIN-code: 7304-0991
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4132-7010>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author