

Научная статья

УДК 552.111

doi: 10.17223/25421379/23/5

ОЛИВИН И ХРОМШПИНЕЛИДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НОРИЛЬСК-1: ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ



Иван Федорович Чайка¹, Андрей Эмильевич Изох²,
Валерий Михайлович Калугин³, Людмила Михайловна Житова⁴,
Геннадий Иванович Шведов⁵, Марина Павловна Гора⁶, Артем Яковлевич Шевко⁷

¹ Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, Россия

^{1, 2, 3, 4, 6, 7} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

^{2, 4} Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁵ Институт горного дела, геологии и геотехнологий, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

¹ ivanlab211@gmail.com

² izokh@igm.nsc.ru

³ valery_kalugin@mail.ru

⁴ zhitova@igm.nsc.ru

⁵ g.shvedov@mail.ru

⁶ gora@igm.nsc.ru

⁷ sp@igm.nsc.ru

Аннотация. Изучались составы оливина и хромшпинелидов из вкрапленных сульфидных и малосульфидных Cu-Ni-ЭПГ руд интрузии Норильск-1 (Норильский район Сибирской пермо-триасовой изверженной провинции) и проводилось их сравнение с составами оливина и хромита из эффузивов того же района. Показано, что хромшпинелиды интрузии Норильск-1 интенсивно переуравновешивались со средой кристаллизации и вмещающими силикатами, а составы оливина указывают на силикатно-сульфидную ликвацию (падение Ni), а затем – на переуравновешивание оливина с высоко-Ni сульфидом (рост Ni и Fe). Сравнение с эффузивными породами Норильского района позволило предположить, что в формировании рудоносных горизонтов интрузии Норильск-1 принимали участие высоко-Ni магмы, подобные пикробазальтам гудчихинской свиты. Температуры кристаллизации (равновесия) оливин-хромитовой пары для малосульфидных руд и пикробазальтов гудчихинской свиты были близки и варьировали от 1 150 до 1 240 °С. Значения фугитивности кислорода, оцененные по оливин-шпинелевой паре и $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ отношению в хромшпинелиде составили ($\log_{10}f(\text{O}_2)$): –7,5 ... –9 для вкрапленных сульфидных руд; –7 ... –12 для малосульфидных руд; –9 ... –9,8 для пикробазальтов гудчихинской свиты. Широкие вариации $\log_{10}f(\text{O}_2)$ в малосульфидных рудах интрузии Норильск-1 объясняются, по-видимому, ассимиляцией углистых сланцев Тунгуской свиты.

Ключевые слова: Норильск-1, хромит, оливин, малосульфидные руды, вкрапленные сульфидные руды

Благодарности: Авторы выражают благодарность В.А. Гусеву за помощь в полевых работах, Н.Д. Толстых и Дж. Гарсия за помощь в обработке образцов скважины РН265, аналитику В.А. Даниловской за проведение количественного анализа минералов.

Источники финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90082. Аналитические работы и пробоподготовка были частично выполнены в рамках государственного задания ИГМ СО РАН и государственного задания ИЭМ РАН (проект АААА-А18-118020590141-4).

Для цитирования: Чайка И.Ф., Изох А.Э., Калугин В.М., Житова Л.М., Шведов Г.И., Гора М.П., Шевко А.Я. Оливин и хромшпинелиды месторождения Норильск-1: особенности состава и петрологические следствия // Геосферные исследования. 2022. № 2. С. 78–100. doi: 10.17223/25421379/23/5

OLIVINE AND Cr-SPINEL FROM THE NORIL'SK-1 DEPOSIT: COMPOSITIONS AND PETROLOGICAL IMPLICATIONS

Ivan F. Chayka¹, Andrey E. Izokh², Valery M. Kalugin³, Lyudmila M. Zhitova⁴,
Gennady I. Shvedov⁵, Marina P. Gora⁶, Artem Ya. Shevko⁷

¹ Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka, Russia

^{1, 2, 3, 4, 6, 7} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

^{2, 4} Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

⁵ School of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹ ivanlab211@gmail.com

² izokh@igm.nsc.ru

³ valery_kalugin@mail.ru

⁴ zhitova@igm.nsc.ru

⁵ g.shvedov@mail.ru

⁶ gora@igm.nsc.ru

⁷ sp@igm.nsc.ru

Abstract. Differentiated intrusions of the "Norilsk type" are among the world's largest deposits of Cu, Ni and platinum group elements (PGE). They are composed of gabbro-dolerites (gabbros with a pronounced ophitic structure), which mineral composition ranges from picritic and troctolitic varieties to leucogabbro and gabbro-diorites. Economically significant reserves are concentrated in three types of ores: (1) massive sulfide ores that form deposits in the bottom parts of the intrusions, (2) disseminated sulfide ores located at the lower parts of the intrusions, and (3) rocks with rich chromite mineralization and high ratios of PGE/Cu-Ni-sulfides - low-sulfide ores that form discontinuous horizons (LS-horizons) in the upper endocontact zones of the intrusions.

Among the hypotheses about the origin of the Norilsk type intrusions, the most acknowledged is the "flow chamber model", within which the intrusions and accumulations of sulfide ores were formed during a long flow through the near-surface chambers of basaltic melts, comagmatic to the basalt formations of the Norilsk region [Naldrett et al., 1992; Rad'ko, 1991]. However, a number of studies show that (1) the intrusions of the Norilsk type have been forming over a long period of time from 290 to 230 Ma [Malitch et al., 2010]; (2) they were formed later than a significant part of the trap basalts [Krivolutskaya, 2016] and (3) the parental magmas for these intrusions differed significantly from the trap ones, and in fact, there are no bona fide co-magmatic rocks of the Norilsk intrusions among the represented basalt formations [Latypov, 2002].

In this work, we consider compositions of olivine and Cr-spinels from disseminated sulfide ores and the LS-horizon of the Norilsk-1 intrusion as petrological indicators, compare them with these minerals in trap basalts, and estimate redox conditions of formation of these types of ores.

It was noted that after crystallization, olivine and chrome spinel re-equilibrated with each other and the environment (melt, other minerals). Olivine in disseminated sulfide ores is characterized by narrow Mg# range and re-equilibration with high Ni sulfides, which is manifested in the growth of Ni and Fe (reverse Ni-Mg # trend) [Barnes et al., 2011; Barnes et al., 2013]. The composition of Cr-spinels varies over a very wide range, especially in Mg # (from 5 to 55) values and TiO₂ (up to 18 %) content, and in Fe²⁺/Fe³⁺ variations. Evolution of the Cr-spinel compositions towards low Mg# values region is characteristic of Cr-spinel inclusions in olivine and clinopyroxene, as well as in altered minerals, while plagioclase hosts more magnesian Cr-spinel grains. Based on the obtained results and data of [Kamenetsky, Crawford, Meffre, 2001] Cr-spinels with Mg # > 25 can be considered relatively primitive (weakly re-equilibrated).

Comparison of the composition of the studied minerals with their counterparts from trap basalts showed that the compositions of olivine, especially in terms of Ni, differ between disseminated ores, LS-horizon and trap basalts. In general, the NiO concentrations in the analyzed olivines lie between the picrobasalts of the Gudchikhinskiy Formation and the basalts of the Tuklonskiy and Nadezhdinsky Formations. However, compositions of olivines of disseminated ores are close to the olivines from picrobasalts of the Gudchikhiiy Formation, as well as several obtained analyzes from the Mokulaevskiy Formation. Cr-spinels of the Norilsk-1 intrusion are generally richer in Ni than the chromites of the Tuklonskiy and Nadezhdinskiy formations and, according to this feature, correspond to the picrobasalts of the Gudchikhinskiy Formation. Based on the data obtained, we assume that the ore-bearing rocks of the Norilsk-1 intrusion were formed from magmas enriched in Ni and similar to the effusive rocks of the Gudchikhinskiy or Mokulaevskiy formations. At the same time, different magmatic impulses and, accordingly, different melt compositions could be responsible for the formation of disseminated sulfide ores and the MS horizon.

Since strong variations in Fe²⁺/Fe³⁺ ratio in Cr-spinels can result from variations in the redox conditions the parental media, we estimated f(O₂) for the rocks of the studied series. As soon as application of olivine-spinel thermometer and oxybarometer was considered as limited due to strong re-equilibration of Cr-spinel [Nikolaev et al., 2016], the olivine-chromite pair was used to calculate the T-f(O₂) parameters for only the most primitive Cr-spinels from the picrobasalts of the Gudchikhinskiy Formation and the LS-horizon of the Norilsk-1 intrusion. The temperature calculated using the Al-in-olivine oxybarometer [Coogan, Saunders, Wilson, 2014] was 1150-1240 °C, and the log₁₀f(O₂) calculated using the Mg-Fe olivine-chromite oxybarometer

[Nikolaev et al., 2016] was -9 - -9.8 for picobasalts, and LS-horizon -8 - -9. To estimate $f(\text{O}_2)$ for the rocks of the LS-horizon that do not contain fresh olivine and for disseminated sulfide ores, in which all olivine - chromite pairs were strongly re-equilibrated, we adopted a semi-quantitative method based on the conversion of $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ in Cr-spinel to $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ in the melt [Maurel, Maurel, 1984] with further estimation of $f(\text{O}_2)$, based on the empirical correlation for basaltic magmas [Fudali, 1965] which was calibrated to $f(\text{O}_2)$ for Cr-spinels of the Gudchikhinskiy Formation, obtained using the olivine-spinel oxybarometer. According to the estimations, disseminated sulfide ores of the Norilsk-1 intrusion crystallized at $\log_{10}f(\text{O}_2)$ from -7.5 to -9, which at 1175 °C is $\sim \text{NNO} \pm 1$ and slightly increased relative to the picobasalts of the Gudchikhinskiy, Nadezhdinskiy and Tuklonskiy formations. For the LS-horizon, estimates of $\log_{10}f(\text{O}_2)$ showed very different values for different samples. In most cases, $\log_{10}f(\text{O}_2)$ at 1175 °C was about -9, which is close to the picobasalts of the Gudchikhinskiy Formation. Nevertheless, some samples showed more oxidized conditions (up to $\log_{10}f(\text{O}_2) = -7$ or $\sim \text{QFM} + 2$), and some samples, on the contrary, down to $\log_{10}f(\text{O}_2) = -12$. The latter are close to the IW (Fe-FeO) buffer and are extremely reduced conditions for igneous rocks. Such broad range of $f(\text{O}_2)$ is unique to the Norilsk-1 intrusion and is not typical for the rocks of the upper endocontact with the LS-horizon of the Talnakh intrusion, for which the $\log_{10}f(\text{O}_2)$ estimates do not fall below the WM ($\text{FeO}-\text{Fe}_3\text{O}_4$) buffer. We assume that the variations in redox conditions in the LS-horizon of the Norilsk-1 intrusion are associated with the intense assimilation of coal shales of the Tunguska Formation.

Keywords: *Noril'sk-1, chromite, olivine, sulfide-poor ores, disseminated sulfide ores*

Acknowledgments: The authors thank V.A. Gusev for the assistance in field works, N.D. Tolstykh and J. Garcia for the help with the samples processing, V.A. Danilovskaya for quantitative analysis of the minerals.

Source of financing: The reported study was funded by RFBR, project number 20-35-90082. Analytical work was partially carried out within the framework of the state assignments to IGM SB RAS and to IEM RAS (project AAAA-A18-118020590141-4) financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Chayka, I.F., Izokh, A.E., Kalugin, V.M., Zhitova, L.M., Shvedov, G.I., Gora, M.P., Shevko, A.Ya. (2022) Olivine and Cr-spinel from the Noril'sk-1 deposit: compositions and petrological implications. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 78–100. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/23/5

Введение

В Норильско-Талнахском рудном районе (далее – Норильский район) Сибирской Пермо-Триасовой LIP (250–230 млн лет [Ivanov et al., 2013]) сосредоточены крупные и сверхкрупные месторождения Cu, Ni и элементов платиновой группы (ЭПГ). Эти месторождения вмещаются интрузиями Норильского комплекса, или «интрузиями Норильского типа», – ультрамафит-мафитиовыми дифференцированными магматическими телами сложной формы, состав пород в которых варьирует от пикритовых габбродолеритов и троктолитов до лейкогаббро и габбро-диоритов. ЭПГ-Cu-Ni руды интрузий Норильского типа делятся на: (1) массивные сульфидные залежи в придонных частях интрузий; (2) богатую сульфидную вкрапленность в оливиновых и пикритовых породах нижних частей интрузий; (3) сульфид-содержащие, богатые хромитом ассоциации с аномально высоким отношением ЭПГ/Cu-Ni-сульфиды (малосульфидные руды), напоминающие рифы интрузий Бушвельд и Стиллуотер [Служеникин и др., 1994] в верхних эндоконтактовых зонах.

Как предполагается, интрузии Норильского типа генетически связаны с трапповыми базальтами Норильского района и образовались в ходе эволюции трапповых магм и их взаимодействия с породами осадочного чехла [Li, Ripley, Naldrett, 2009; Naldrett et al., 1992; Ryabov, Shevko, Gora, 2014; Урванцев,

1972]. Конкретные параметры родоначальных магм для интрузий Норильского типа и физико-химические условия их кристаллизации являются предметом дискуссий. Так, была предложена теория, согласно которой эти интрузии являлись проточными камерами, в которых из расплавов, комагматичных толеитовым базальтам Надеждинской, Моронговской и Мокулаевской свит, в течение длительного времени отделялась сульфидная жидкость, богатая Cu, Ni и ЭПГ [Li, Ripley, Naldrett, 2009; Lightfoot, Keays, 2005; Naldrett et al., 1992; Радько, 1991, 2016]. Тем не менее некоторые исследования доказывают, что интрузии Норильского типа формировались в несколько этапов в интервале 265–230 млн лет [Malitch et al., 2012], и в эффузивной последовательности Норильского района в действительности нет пород, однозначно комагматичных интрузиям Норильского типа [Krivolutskaya, 2016; Latypov, 2007]. Таким образом, задача определения состава и условий кристаллизации магм, сформировавших интрузии Норильского типа, до сих пор актуальна.

Определение параметров родоначальной магмы и физико-химических условий ее кристаллизации основывается главным образом на химическом составе пород. Однако при изучении петрологии сложных интрузивных образований валовые геохимические данные часто являются недостаточными и требуется привлечение других методов, позволяющих исследовать ранние этапы кристаллизации магмы, –

например изучение состава раннемагматических фаз. В данной работе в качестве таких петрологических индикаторов мы исследуем состав оливина, хромшпинели и их равновесной пары из пород, вмещающих вкрапленные сульфидный и малосульфидный (МС) типы оруденения интрузии Норильск-1, а также из пород Талнахской рудоносной интрузии. Мы рассматриваем проблему посткристаллизационного переуравновешения этих минералов между собой и средой кристаллизации, сравниваем составы оливина и хромшпинели во вкрапленных сульфидных рудах, МС-горизонте и вулканических породах Норильского района и оцениваем окислительно-восстановительные условия формирования малосульфидных и вкрапленных сульфидных руд в интрузии Норильск-1.

Геологическая характеристика

В Норильско-Талнахском рудном районе, расположенном на северо-западной окраине Сибирской платформы, на ее стыке с Тунгусской синеклизой и Енисей-Хатангским прогибом, широко развиты проявления пермо-триасового траппового магматизма, представленные близповерхностными (главным образом силлообразными) интрузиями и мощной толщей базальтов. Толща базальтов перекрывает верхнепермские осадочные породы и состоит из следующих свит: ивакинской, сыверминской, гудчихинской, хаканчанской, туклонской, надеждинской, моронговской, мокулаевской, хараелахской, кумгинской и самоедской. Среди этой последовательности выделяется высокотитанистая ($\text{TiO}_2 > 2\text{--}3\%$) серия, включающая ивакинскую, сыверминскую и гудчихинскую свиты, в то время как вышележащие формации сложены в основном низкотитанистыми ($\text{TiO}_2 < 1\%$) толитами [Krivolutskaya et al., 2018]. Из представленных в Норильском районе эффузивных свит только гудчихинская состоит из высокомагнезиальных пород с фенокристами оливина и хромшпинелью. Также эти минералы типичны для отдельных «лавовых озер» в туклонской и надеждинской свитах и встречаются в виде редких фенокристов в толитах мокулаевской свиты.

Среди множества интрузий Норильского района только несколько, выделяемых в так называемый Норильский интрузивный комплекс (или интрузии Норильского типа), содержит промышленные месторождения Cu, Ni и ЭПГ. Эти интрузии вмещаются палеозойскими осадочными толщами чехла Сибирской платформы: мелкозернистыми терригенными породами, углистыми сланцами, морскими карбонатными отложениями и эвапоритами [Distler, Kunilov, 1994; Krivolutsкая, 2016; Likhachev, 1994; Ryabov, Shevko, Gora, 2014; Налдретт, 2003; Туровцев, 2003],

а также прорывают трапповые базальты до надеждинской и, вероятно, моронговской свит [Krivolutskaya, 2016]. В составе интрузий Норильского типа выделяется, как правило, три основных зоны, сложенных породами, называемыми габбродолеритами (полнокристаллическая мелкозернистая основная порода габбрового состава с офитовой структурой) [Distler et al., 1999; Ryabov, Shevko, Gora, 2014] (рис. 1, 2). Нижняя зона образована безрудными контактовыми габбродолеритами и неоднородно-текстурными (такситовыми) габбродолеритами с вкрапленной сульфидной минерализацией. Главная дифференцированная зона состоит из последовательности от рудных пикритовых габбродолеритов через минерализованные оливиновые и безоливиновые габбродолериты до слабоминерализованных габбро-диоритов. Верхняя зона (верхняя эндоконтактовая зона, ВЭЗ) образована горизонтами лейкогаббро, пикритовыми, такситовыми и оливиновыми габбродолеритами, магматической брекчией и контактовыми габбродолеритами. Богатые вкрапленные руды приурочены в основном к пикритовым и такситовым габбродолеритам нижней части интрузий, а малосульфидные руды чаще всего встречаются среди лейкогаббро, пикритовых и такситовых габбродолеритов ВЭЗ, часто аномально богатых хромшпинелидов [Служеникин и др., 1994]. Ассоциация пород, вмещающих малосульфидные руды, прослеживается по простиранию интрузий и называется малосульфидным горизонтом (МС-горизонтом).

Образцы и методы

Для исследования использовались оливин- и хромит-содержащие образцы вкрапленных сульфидных и малосульфидных руд интрузии Норильск-1. Образцы отбирались из открытой выработки (карьер Медвежий ручей) и из кернов скважин МС24 (МС-оруденение) и РН265 (вкрапленное сульфидное оруденение) (рис. 2). Кроме этого, в работе использованы образцы пикробазальтов гудчихинской свиты, отобранные из коренных обнажений в бассейне р. Южный Икэн ($N 69,7966^\circ$, $E 90,1237^\circ$) (см. рис. 1, а). Петрографическое и минералогическое исследование проводилось при помощи бинокля и оптического микроскопа Carl Zeiss A1 в шлифованных штуфах и полированных шлифах и на электронно-сканирующих микроскопах Tescan Mira 3 LMU (Oxford INCA Energy XMax 80 detector) и JEOL JSM 1650 LV (Центр Коллективного Пользования ИГМ СО РАН) в полированных шлифах и аншлифах. Для количественного анализа оливина и хромшпинели использовался электронно-зондовый микроанализ (JEOL JXA-8320 и JEOL JXA-8100; ЦКП ИГМ СО РАН).

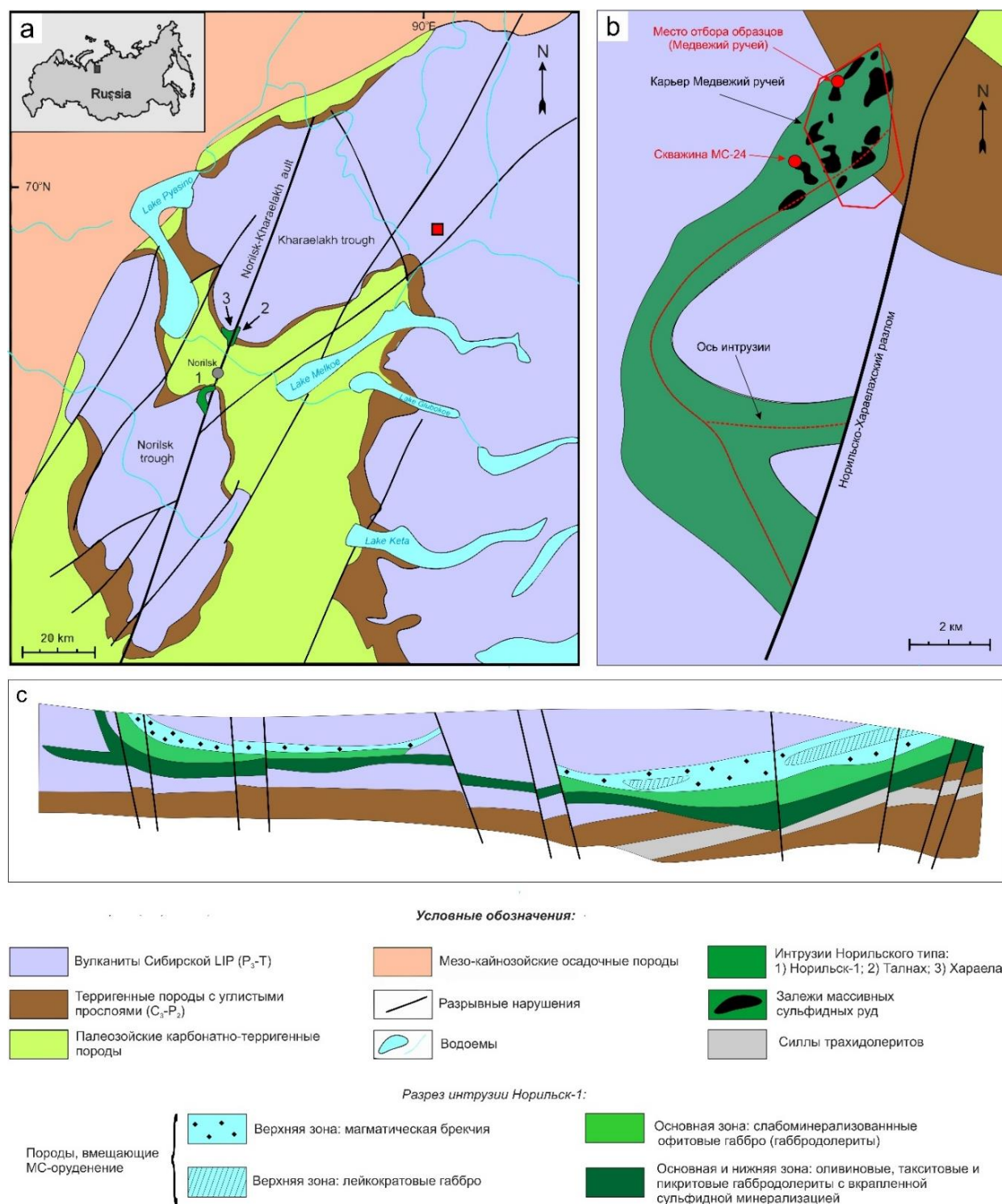


Рис. 1. Интрузия Норильск-1 в структуре Норильского района Сибирской ЛП

(a) Геологическая карта Норильско-Талнахского рудного узла и прилегающих территорий: по данным [Струнин и др., 1994], красным квадратом показано место отбора гудчихинских пикробазальтов (B20104, р. Южный Икэн); (b) проекция интрузии Норильск-1 по данным бурения [Служеникин и др., 1994] с местами пробоотбора; (c) схематический разрез интрузии Норильск-1 в районе карьера Медвежий ручей [Duzhikov et al., 1992; Иванов и др., 1971]

Fig. 1. Noril'sk-1 intrusion in the structure of the Noril'sk region (Siberian LIP)

(a) Geological map of the Noril'sk-Talnakh ore junction and adjacent areas: after [Strunin et al., 1994], red rectangle marks the sampling location of the Gudchikhinskiy basalts (B20104, Southern Iken river) (b) projection of the Noril'sk-1 intrusion on the surface based on the drilling data [Sluzhenikin et al., 1994] with the sampling locations, (c) schematic cross-section of the Noril'sk-1 intrusion in the area of the Medvezhiy Ruchey open pit [Duzhikov et al., 1992; Ivanov et al., 1971]

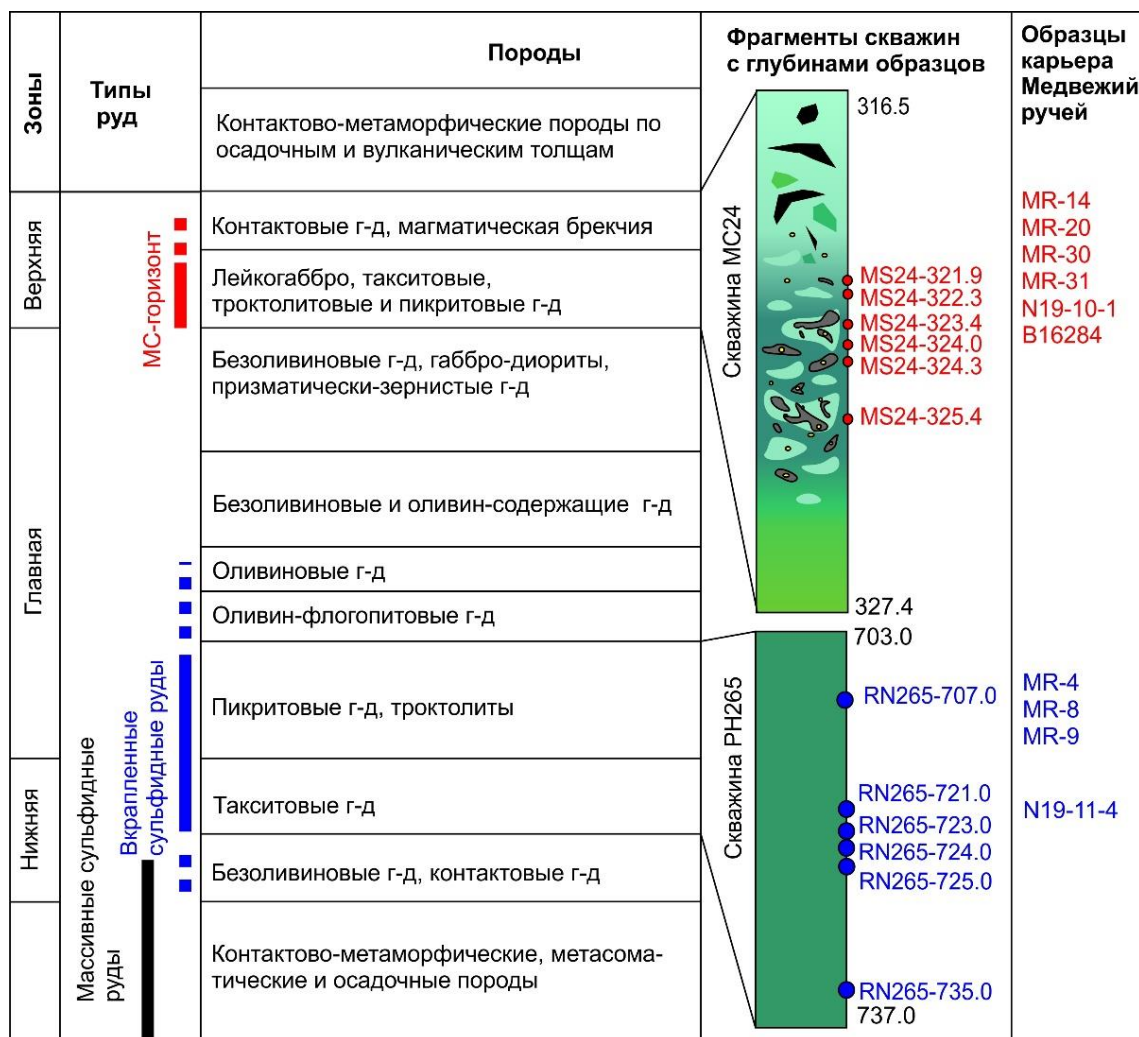


Рис. 2. Обобщенный разрез интрузий Норильского типа по [Distler et. al., 1999] и положение изученных образцов в кернах скважин и интрузии Норильск-1 в целом

На колонке скважины MS-24 цветами показаны: светло-зеленый – лейкократовые габброиды, темно-зеленый – меланократовые (пикритовые) габброиды, серый – хромитовая минерализация, желтый – Cu-Ni сульфиды, черный – фрагменты углистых сланцев в магматической брекчии

Fig. 2. A generalized cross-section of the Noril'sk-type intrusions after [Distler et. al., 1999] and locations of the studied samples in the drill cores and in the Noril'sk-1 intrusion in general

On the MC-24 column colors correspond to: light-green – leucocratic gabbros, dark-green – melanocratic (picritic) gabbros, grey – chromite mineralization, yellow – Cu-Ni sulfides, black – brecciated fragments of coal shales

Оливин анализировался при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе 900 нА [Batanova, Sobolev, Kuzmin, 2015; Batanova, Sobolev, Magnin, 2018], хромшпинелиды – при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 50 нА. В ходе количественного анализа использовались природные стандарты, состав которых измерялся каждые 30–50 анализов. Суммарное Fe, полученное при анализе, пересчитывалось на Fe^{2+} и Fe^{3+} по дефициту заряда в приближении идеальной стехиометрии шпинели AB_2O_4 и постоянных зарядов других катионов [Droop, 1987]. Для расчета физико-химических параметров применялись методы оценки

температуры и фугитивности кислорода, основанные на равновесном распределении элементов между оливином и хромшпинелидом [Coogan, Saunders, Wilson, 2014; Nikolaev et al., 2016] и соотношением Fe^{2+}/Fe^{3+} в хромшпинелиде [Fudali, 1965; Maurel, Maurel, 1984] (см.: Обсуждение результатов).

Результаты

Минералого-петрографическая характеристика пород. Образцы вкрапленных сульфидных руд интрузии Норильск-1 представлены оливиновыми (Ol 10–

30 %), пикритовыми ($OI > 30\%$) и такситовыми (неоднородной текстуры и минерального состава) габбро-родолеритами. Характерной особенностью этих пород является богатая платиноидами сульфидная минерализация, состоящая из каплевидных, вкрапленных и прожилково-вкрапленных сегрегаций (рис. 3 а, б) состава пирротин + халькопирит + пентландит $\pm$ таллахит $\pm$ кубанит, которая подробно рассмотрена в ряде более ранних публикаций [Genkin, Evstigneeva, 1986; Naldrett et al., 1994; Tolstykh et al., 2020]. Силикатная часть пород состоит из плагиоклаза (10–60 %), клинопироксена (10–30 %) и оливина (10–60 %). Плагиоклаз и оливин резко идиоморфны по отношению к клинопироксену, зерна оливина, как правило, идиоморфны по отношению к плагиоклазу, и наиболее магнезиальные породы (пикритовые габбро-родолериты) рассматриваются как оливиновые кумуляты [Distler et al., 1999; Latypov, 2007]. В качестве вторичных силикатных минералов по плагиоклазу развивается альбит-серцитовый агрегат (соссюрит), по клинопироксену – хлорит и волокнистые амфиболы, оливин интенсивно замещается минералами группы илдингсита / боулингита и серпентитом. Хромшпинелиды в породах вкрапленных сульфидных руд распределены неравномерно, встречаются как в виде акцессорной минерализации, так и образуют более густую вкрапленность (до 1 об. %) в минералах силикатной матрицы (см. рис. 3, б).

Породы МС-горизонта характеризуются разнообразным составом и неоднородными текстурно-структурными признаками, которые детально описаны в работах С.Ф. Служеникина [Distler et al., 1999; Sluzhenikin et al., 2020; Служеникин и др., 1994] и В.В. Рябова с соавт. [Ryabov, Shevko, Gora, 2014]. Среди этих пород выделяются следующие типы:

1. Такситовые габбро-родолериты, в которых перемежаются участки разного состава – от пикритовых до лейкократовых, а также содержится большое количество сегрегаций водосодержащих минералов: флогопита, пренита, хлорита, волокнистых амфиболов (рис. 3, с, d).

2. Лейкогаббро и троктолиты с большим количеством плагиоклаза, варьирующим содержанием оливина и низкой долей клинопироксена.

3. Пикритовые габбро-родолериты, по составу и структуре силикатной матрицы близкие породам из нижних частей интрузии.

Сульфидная минерализация в породах МС-горизонта представлена той же ассоциацией, что и во вкрапленных сульфидных рудах (см. рис. 3, с), однако общее количество сульфидов в МС-горизонте в целом меньше, чем в последних, в то время как платиноидная минерализация чрезвычайно богата. Среди минералов платиновой группы обнаружено более 40 минералов и интерметаллидов, главным

образом палладия и платины [Sluzhenikin и др., 2020; Tolstykh et al., 2019; Дистлер, 1994; Служеникин и др., 1994]. Характерная особенность пород МС-горизонта, наряду с высоким тенором ЭПГ позволившая рассматривать этот горизонт в качестве аналога рифам Бушвельда и Стиллуотера [Служеникин и др., 1994], – богатая вкрапленность хромшпинелидов. Содержание хромшпинелида может достигать 30 об. % (в среднем 1–10 об. %), в то время как его зерна встречаются во всех минералах силикатной матрицы. Отмечается, однако, что в плагиоклазе и клинопироксене включений хромшпинели значительно больше, чем в оливине. При этом те зерна, которые находятся в оливине, чаще всего приурочены к трещинам и лишь в единичных случаях полностью изолированы минералом-хозяином (рис. 3, е).

Пикробазальты Гудчихинской свиты представлены породами порфировой структуры с вкрапленниками оливина до 3–5 мм и раскристаллизованной основной массой, образованной гипидиоморфными индивидами клинопироксена и плагиоклаза. Магнетит и ильменит встречаются в основной массе, а хромит – в виде включений в оливине либо в замещающем его серпентине (рис. 3, f).

Химический состав оливина и хромшпинелидов. Оливин как из МС-горизонта, так и из вкрапленных сульфидных руд характеризуется в целом низкой магнезиальностью (или долей форстеритового минерала) ($Mg\# = Mg/(Mg + Fe)$ ат. %), которая варьирует от 67 до 82 в малосульфидных рудах и от 69 до 78 во вкрапленных сульфидных рудах (табл. 1). Содержание NiO в оливине изменяется в целом от 0,18 до 0,32 мас. % (рис. 4, а). При этом концентрация Ni в оливине из МС-горизонта слабо коррелирует с $Mg\#$ и несколько понижена относительно пород с вкрапленной сульфидной минерализацией, а в последних выделяется группа анализов с низкой $Mg\#$, для которых прослеживается обратная корреляция NiO и $Mg\#$ (см. рис. 4, а). Содержание MnO в оливине из обоих горизонтов характеризуется приблизительно одинаковой выраженной обратной корреляцией с $Mg\#$ и одним и тем же диапазоном концентраций (от 0,29 до ~ 0,44–0,49 %) (рис. 4, б). По соотношениям в системе NiO–MnO–FeO–MgO оливины из вкрапленных сульфидных и малосульфидных руд тем не менее существенно различаются. Для оливина из вкрапленных сульфидных руд корреляция в паре NiO–MnO практически не наблюдается, в то время как в малосульфидных рудах NiO обратно коррелирует с MnO (рис. 4, с). На диаграмме Ni/(Mg/Fe)–Mn/Fe [Sobolev et al., 2007] популяции оливина из сравниваемых ассоциаций интрузии Норильск-1 различаются наиболее четко (рис. 4, d). Магнезиальность оливина из пикробазальтов гудчихинской свиты варьирует от 74

до 81, что попадает в диапазон значений, полученный ранее по широкой выборке этих пород в Но-

рильском районе [Sobolev et al., 2007; Соболев, Криволицкая, Кузьмин, 2009] (см. рис. 4).

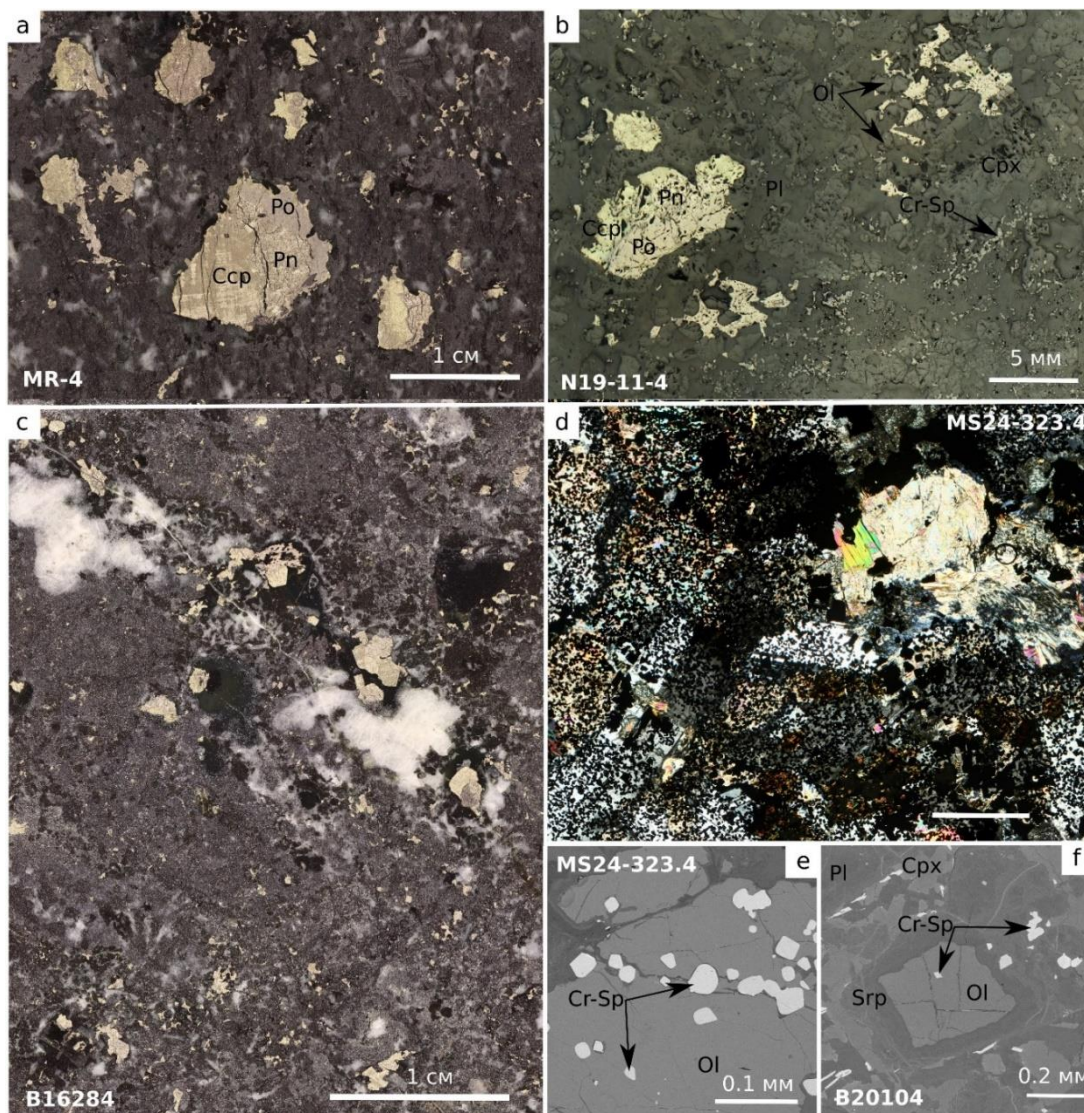


Рис. 3. Минералого-петрографические особенности пород интрузии Норильск-1 и пикробазальтов Гудчихинской свиты

(a) Каплевидные обособления сульфидов в оливиновом габбро-долерите интрузии Норильск-1 (вкрапленные сульфидные руды, карьер Медвежий ручей, пришлифовка); (b) прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация и вкрапленность хромшпинелидов в такситовом габбро-долерите (вкрапленные сульфидные руды, карьер Медвежий ручей, полированный шлиф, отраженный свет); (c) такситовый габбро-долерит с сульфидной минерализацией (МС-горизонт, карьер Медвежий ручей, пришлифовка); (d) богатая вкрапленность хромшпинелида в существенно лейкократовом участке такситового габбро-долерита, справа вверху видна биотит-амфиболовая сегрегация (МС-горизонт, карьер Медвежий ручей, полированный шлиф, проходящий свет, скрещенные поляризаторы); (e) включения хромшпинелидов в оливине из пикритового габбро-долерита МС-горизонта (полированный шлиф, BSE-фото) (f) фенокристал оливина с включениями хромита и окружающая его основная масса, пикробазальт Гудчихинской свиты (полированный шлиф, BSE-фото)

Fig. 3. Mineralogical and petrographic features of the rocks of the Noril'sk-1 intrusion and picrobasalts of the Gudchikhinskiy Formation

(a) Droplet-like sulfide segregations in olivine gabbro-dolerite of the Noril'sk-1 intrusion (disseminated sulfide ores, Medvezhiy Ruchey open pit, grinded sample); (b) vein-disseminated sulfide mineralization and Cr-spinel dissemination in taxitic gabbro-dolerite (disseminated sulfide ores, Medvezhiy Ruchey open pit, polished thin section, reflected light); (c) taxitic gabbro-dolerite with sulfide mineralization (sulfide-poor horizon, Medvezhiy Ruchey open pit, grinded sample); (d) dense Cr-spinel dissemination in considerably leucocratic site of a taxitic gabbro-dolerite, in the upper right part there is a biotite-amphibole segregation (sulfide-poor horizon, Medvezhiy Ruchey open pit, polished thin section, transmitted light, crossed polarizers); (e) inclusions of Cr-spinel in olivine from picritic gabbro-dolerite of the sulfide-poor horizon (polished thin section, BSE-photo); (f) olivine phenocryst with chromite inclusions and the surrounding groundmass, picrobasalt of the Gudchikhinskiy Formation (polished thin section, BSE-photo)

Таблица 1

Представительные составы оливина из малосульфидных и вкрапленных сульфидных руд интрузии Норильск-1

Table 1

Representative analyses of olivine from the sulfide-poor and disseminated sulfide ores of the Noril'sk-1 intrusion

№ ан.	Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	CoO	ZnO	NiO	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма	Mg#
1	B16284	39,82	0,03	0,02	0,07	41,72	17,94	0,28	0,02	0,01	0,25	0,11	0,01	—	100,29	80,56
2		39,87	0,06	0,01	0,42	42,81	17,00	0,28	0,02	0,01	0,28	0,04	0,01	0,01	100,80	81,78
3		39,17	0,03	0,02	0,06	40,40	19,55	0,32	0,03	0,01	0,25	0,16	0,01	—	100,00	78,64
4		38,75	0,05	0,02	0,03	38,87	21,40	0,35	0,03	0,01	0,34	0,10	—	—	99,95	76,40
5		39,23	0,04	0,02	0,08	39,77	20,27	0,33	0,02	0,01	0,25	0,12	0,01	0,01	100,15	77,76
6	MS24-323,4	37,41	0,03	0,02	0,18	33,24	27,93	0,48	0,02	0,02	0,19	0,11	—	0,02	99,65	67,95
7		37,89	0,03	0,02	0,08	35,55	25,67	0,43	0,02	0,01	0,18	0,13	—	0,02	100,05	71,16
8		37,47	0,03	0,02	0,19	34,49	27,07	0,47	0,02	0,01	0,17	0,12	—	0,02	100,10	69,41
9	N19-10-2	38,37	0,04	0,02	0,03	38,84	21,97	0,35	0,03	0,01	0,22	0,12	—	0,01	100,00	75,91
10		38,71	0,03	0,02	0,09	39,97	20,41	0,34	0,02	0,01	0,22	0,10	—	0,01	99,93	77,72
11		38,78	0,03	0,02	0,36	40,73	20,08	0,33	0,02	0,01	0,21	0,09	—	0,01	100,67	78,33
12	RN265-721	39,21	0,03	0,02	0,02	39,75	21,08	0,31	0,03	0,02	0,27	0,12	—	0,01	100,87	77,06
13		38,93	0,05	0,01	0,03	39,26	21,52	0,32	0,02	0,02	0,32	0,09	—	0,01	100,58	76,47
14		38,90	0,06	0,03	0,30	39,91	20,78	0,29	0,02	0,02	0,28	0,12	—	0,02	100,73	77,38
15	RN265-723	38,50	0,03	0,02	0,02	40,04	21,09	0,31	0,03	0,02	0,31	0,13	—	0,01	100,49	77,18
16		38,96	0,04	0,02	0,05	40,02	21,02	0,30	0,03	0,02	0,26	0,10	—	0,01	100,82	77,23
17	RN265-724	38,61	0,04	0,01	0,03	40,26	20,53	0,30	0,03	0,02	0,31	0,11	—	0,01	100,26	77,74
18		37,98	0,12	0,09	0,46	36,04	25,66	0,32	0,02	0,01	0,19	0,04	0,02	0,01	100,98	71,45
19		38,87	0,04	0,01	0,01	40,29	21,21	0,30	0,02	0,02	0,31	0,09	—	0,01	101,18	77,19
20		39,00	0,04	0,02	—	40,39	20,85	0,30	0,03	0,02	0,34	0,07	—	0,02	101,07	77,54
21		38,88	0,04	0,01	0,01	40,71	20,76	0,30	0,03	0,02	0,28	0,11	—	0,01	101,15	77,75
22	RN265-725	38,81	0,03	0,02	0,08	40,07	20,94	0,29	0,03	0,02	0,29	0,15	—	—	100,74	77,32
23		39,13	0,03	0,02	0,02	39,82	20,76	0,30	0,03	0,02	0,28	0,14	—	0,01	100,55	77,36
24		39,14	0,03	0,02	0,05	39,88	20,99	0,30	0,03	0,02	0,31	0,14	—	0,02	100,91	77,20
25	RN265-735	38,53	0,04	0,01	0,01	38,69	22,08	0,31	0,03	0,02	0,21	0,13	—	0,01	100,05	75,74
26		38,64	0,10	0,01	0,03	38,68	22,62	0,31	0,02	0,02	0,26	0,10	—	0,02	100,83	75,29
27		38,85	0,07	0,01	—	39,09	22,01	0,31	0,03	0,02	0,22	0,09	—	0,03	100,72	75,99
28	N19-11-4	37,66	0,04	0,01	0,02	35,83	25,47	0,41	0,03	0,02	0,28	0,15	—	0,01	99,93	71,48
29		37,94	0,04	0,02	0,07	35,23	26,26	0,42	0,03	0,02	0,27	0,13	—	—	100,43	70,51
30		38,34	0,05	0,02	0,23	38,40	22,91	0,37	0,03	0,01	0,24	0,11	—	0,01	100,72	74,91
31	MR-4	38,78	0,03	0,02	0,04	39,38	21,31	0,33	0,03	0,02	0,30	0,14	—	—	100,36	76,71
32		37,95	0,09	0,02	0,02	37,09	24,36	0,38	0,03	0,02	0,29	0,12	—	0,14	100,51	73,06
33		38,06	0,03	0,02	0,14	36,84	24,75	0,38	0,03	0,02	0,30	0,13	—	0,01	100,73	72,62
34		38,34	0,03	0,02	0,05	39,30	21,20	0,33	0,03	0,02	0,30	0,17	—	—	99,80	76,76
35	MR-8	38,16	0,04	0,02	0,05	36,54	24,40	0,39	0,03	0,02	0,26	0,12	—	—	100,01	72,74
36		37,36	0,03	0,02	0,02	34,91	27,11	0,41	0,03	0,03	0,29	0,11	—	0,01	100,31	69,64

Примечание. Полную базу составов оливина и хромшпинелидов, использованных в этой работе, можно получить у авторов по запросу (ivanlab211@gmail.com).

Note. Complete spreadsheet with olivine and Cr-spinel compositions used in this study is available from the corresponding author on request (ivanlab211@gmail.com).

Близость полученных нами и ранее опубликованных данных по оливину из пород гудчихинской свиты прослеживается и по другим примесным компонентам, кроме NiO, концентрации которого в проанализированном оливине (0,24–0,27) оказались существенно ниже, чем для ранее изучавшихся пикробазальтов этой свиты (см. рис. 4, а). Поскольку пока не вполне ясно, с чем именно связано это отклонение в составе, далее в этой работе мы ориентируемся на концентрации NiO, опубликованные А.В. Соболевым и

Н.А. Криволицкой [Sobolev et al., 2007; Соболев, Криволицкая, Кузьмин, 2009].

Хромшпинелиды в изученных породах из горизонтов вкрапленных сульфидных и малосульфидных руд интрузии Норильск-1 характеризуются широкими диапазонами составов (табл. 2). Как и для Талнахской [Barnes, Kuniyov, 2000; Ryabov, Shevko, Gora, 2014; Гора, Шевко, Житова, 2012], их магнетизм варьирует от ~ 58 до практически нулевых значений и выраженно коррелирует с хромистостью

($Cr\# = Cr/(Cr + Al)$ ат. %), которая растет от 60–70 до 80–100 от наиболее к наименее магнезиальным миналам (рис. 5, а). При этом детальное исследование зависимости состава хромита от минерала-хозяина показало, что магнезиальные составы характерны для зерен, заключенных в неизменном плагиоклазе, промежуточные – для зерен в измененном плагиоклазе и свежих темноцветах, а наиболее железистые хромшпинелиды содержатся в измененных темноцветах [Chayka et al., 2020a]. Несмотря на схожие взаимоотношения $Mg\#$ и $Cr\#$, по поведению Fe и Ti хромшпинелиды МС-горизонта интрузии Норильск-1 резко отличаются от хромшпинелидов

вкрапленных руд этой же интрузии и Талнахской интрузии в целом и характеризуются широкими вариациями по этим элементам, причем для разных образцов типичны разные и даже контрастные тренды (рис. 5, b–e). Большинство хромшпинелидов интрузии Норильск-1, как и Талнахской интрузии, эволюционирует от магнезиохромита к хромистому титаномагнетиту. Тем не менее для хромшпинелидов из некоторых образцов МС-горизонта интрузии Норильск-1 нетипичны рост Fe^{3+} и уменьшение содержания Cr с падением магнезиальности: их составы эволюционируют в сторону высокохромистой ульвошпинели (см. рис. 5, b, e).

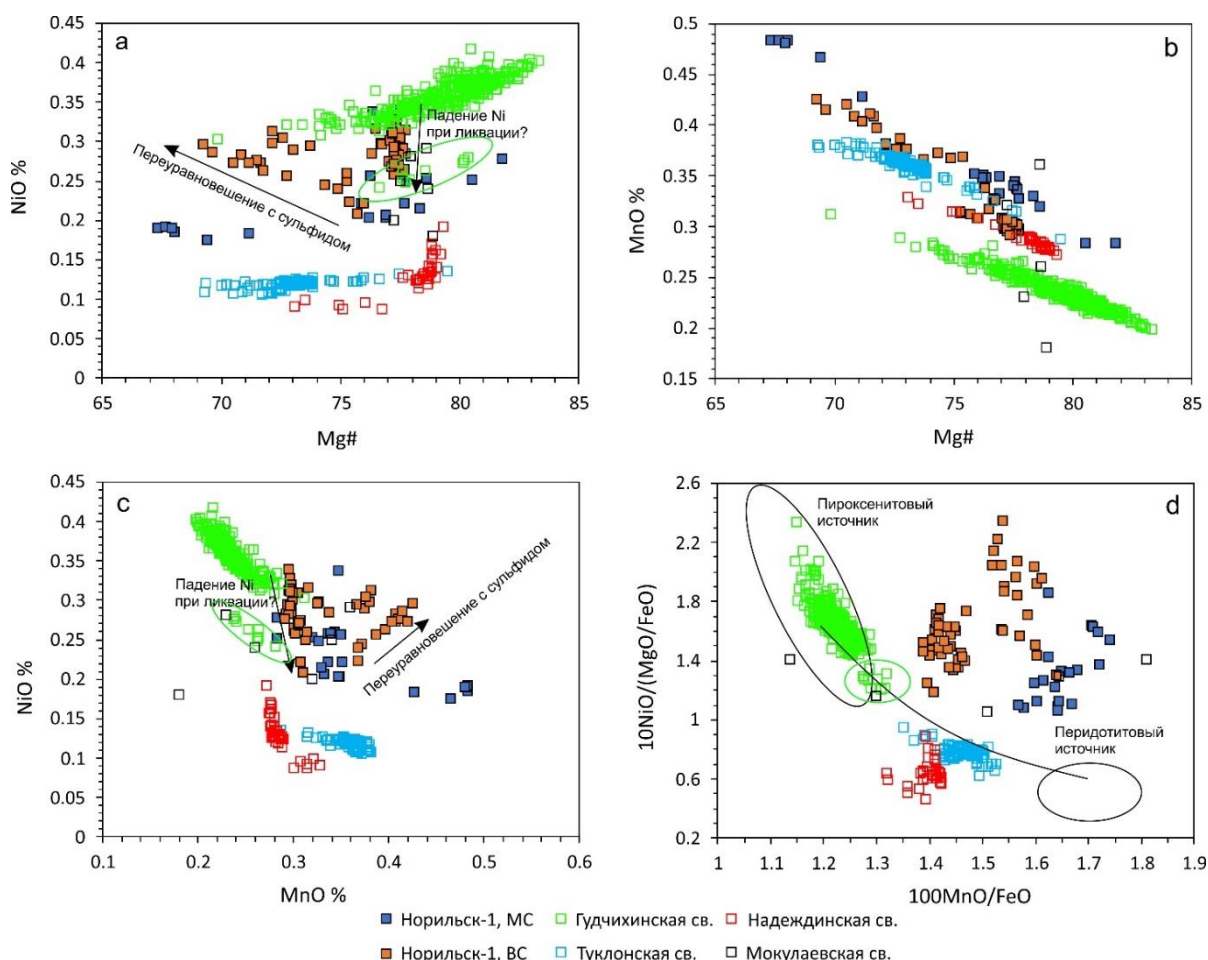


Рис. 4. Вариационные диаграммы с составами оливина из пород интрузии Норильск-1 и вулканических пород Норильского района

МС – малосульфидный горизонт, ВС – вкрапленные сульфидные руды. Данные для интрузии Норильск-1 и Мокулаевской свиты – авторские, для Гудчихинской свиты – авторские и [Sobolev et al., 2007; Sobolev, Krivolutsкая, Кузьмин, 2009], для Туклонской и Надеждинской свит – [Соболев, Криволюцкая, Кузьмин, 2009]; поля пироксенитового и перидотитового источников на (d) – [Sobolev et al., 2007]. Светло-зеленым обведены низко-Ni анализы, полученные для пикробазальта гудчихинской свиты (обр. B20104).

Fig. 4. Variation diagrams with plotted compositions of olivine from the rocks of the Noril'sk-1 intrusion and volcanic rocks of the Noril'sk area

MC – sulfide-poor horizon, BC – disseminated sulfide ores. Sources of data: Noril'sk-1 intrusion and Mokulaevskiy Formation – this study; Gudchikhinskiy Formation – this study and [Sobolev et al., 2007; Sobolev, Krivolutsкая, Kuz'min, 2009], Tuklonskiy and Nadezhdinskiy Formations – [Sobolev, Krivolutsкая, Kuz'min, 2009]; fields of pyroxenitic and peridotitic sources on (d) – [Sobolev et al., 2007]. Outlined by light-green line are the low-Ni compositions of the olivine from Gudchikhinskiy picrobasalt (sample B20104)

Таблица 2

Представительные составы хромшпинелидов из малосульфидных и вкрапленных сульфидных руд интрузии Норильск-1

Table 2

Representative analyses of Cr-spinel from the sulfide-poor and disseminated sulfide ores of the Noril'sk-1 intrusion

№ ан.	Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	FeO*	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	ZnO	NiO	Сумма	Mg#	Cr#	Fe ²⁺ /Fe ³⁺
1	MR-30	0,02	11,96	4,31	17,79	0,76	57,71	37,45	22,51	0,49	2,99	0,11	0,21	96,34	12,47	81,24	1,85
2		0,02	3,95	16,72	40,64	0,49	30,55	27,67	3,20	0,36	6,61	0,20	0,06	99,59	29,84	71,85	9,62
3		0,03	2,74	21,47	39,67	0,40	26,99	24,19	3,10	0,28	9,00	0,14	0,06	100,78	39,86	65,99	8,66
4		0,04	10,65	5,24	40,92	0,50	38,30	36,79	1,67	0,42	3,41	0,09	0,13	99,70	14,19	89,13	24,43
5		0,02	12,69	3,94	36,57	0,52	41,21	39,18	2,25	0,40	2,53	0,19	0,14	98,20	10,30	90,69	19,32
6		0,04	4,71	14,06	40,98	0,49	33,04	30,39	2,95	0,37	4,84	0,20	0,07	98,81	22,11	75,38	11,46
7		-	10,69	6,47	39,95	0,51	37,09	35,35	1,93	0,37	4,53	0,13	0,10	99,84	18,57	86,63	20,38
8		0,06	2,35	24,96	36,61	0,38	26,42	23,43	3,32	0,26	9,68	0,16	0,06	100,94	42,39	60,63	7,85
9	MS24-324-3	0,71	1,99	11,33	34,55	0,46	43,04	28,02	16,69	0,46	4,92	0,17	0,12	97,75	23,83	76,20	1,87
10		0,01	4,61	8,97	32,88	0,52	45,96	30,96	16,67	0,50	3,57	0,17	0,14	97,32	17,04	79,38	2,06
11		0,48	3,22	12,08	34,87	0,50	39,36	27,77	12,88	0,46	5,43	0,16	0,13	96,70	25,84	75,19	2,40
12	MS24-325-4	0,01	4,85	10,76	34,88	0,39	40,59	28,65	13,27	0,36	5,46	0,11	0,34	97,75	25,34	77,30	2,40
13		0,02	11,11	6,01	18,56	0,80	56,73	37,34	21,55	0,49	2,84	0,09	0,22	96,87	11,94	76,42	1,93
14		0,02	1,12	24,04	35,96	0,30	27,35	18,76	9,55	0,33	11,93	0,09	0,22	101,36	53,12	61,10	2,18
15	N19-10-2	0,04	1,43	18,55	36,85	0,29	30,32	18,86	12,73	0,29	11,16	0,09	0,12	99,13	51,32	67,59	1,65
16		0,01	4,48	11,06	33,99	0,43	39,90	26,12	15,31	0,40	6,97	0,11	0,20	97,54	32,23	76,34	1,90
17		0,02	6,45	6,90	31,58	0,51	45,99	29,98	17,79	0,46	5,11	0,14	0,20	97,36	23,29	82,78	1,87
18	B16284-1	0,01	3,34	10,29	37,74	0,43	38,50	24,87	15,15	0,45	7,11	0,17	0,22	98,28	33,76	79,38	1,82
19		0,02	3,26	6,98	37,52	0,38	42,05	25,51	18,38	0,55	6,08	0,12	0,25	97,22	29,80	84,95	1,54
20		0,03	1,36	21,16	36,59	0,33	29,12	20,05	10,08	0,32	10,65	0,14	0,15	99,84	48,62	64,48	2,21
21	N19-11-4	0,01	9,30	5,09	21,53	0,76	54,93	35,39	21,71	0,48	2,62	0,09	0,15	94,97	11,65	81,61	1,81
22		0,01	1,31	21,32	35,44	0,31	30,01	19,24	11,97	0,34	11,26	0,08	0,18	100,27	51,06	63,58	1,79
23		-	6,98	8,94	30,15	0,64	44,32	28,99	17,04	0,37	6,49	0,08	0,27	98,24	28,50	77,99	1,89
24	MR-9	0,02	2,24	16,30	40,07	0,55	30,76	21,82	9,93	0,33	9,62	0,09	0,11	100,11	43,98	72,07	2,44
25		0,01	7,94	4,73	18,32	0,73	60,86	35,07	28,66	0,38	2,18	0,08	0,21	95,44	9,98	80,26	1,36
26		-	12,80	4,40	18,39	0,76	54,91	35,85	21,18	0,43	4,62	0,10	0,20	96,61	18,67	81,45	1,88
28	MR-4	0,06	17,87	3,58	8,76	1,51	58,58	39,71	20,97	0,46	4,81	0,08	0,35	96,07	17,75	71,96	2,10
29		0,14	0,95	23,74	33,81	0,29	28,01	18,20	10,89	0,32	11,91	0,14	0,12	99,42	53,82	59,93	1,86
30		0,06	2,25	11,84	33,69	0,41	42,00	25,29	18,56	0,31	6,35	0,13	0,18	97,22	30,90	74,92	1,51
31	MR-8	0,04	3,44	1,62	10,37	0,56	74,15	31,88	46,97	0,34	0,73	0,04	0,24	91,51	3,92	87,02	0,75
32		0,03	6,72	9,81	28,86	0,77	42,38	26,56	17,59	0,35	7,82	0,10	0,23	97,06	34,40	75,54	1,68
33	RN265-707	0,01	9,30	8,05	31,41	0,71	44,15	34,04	11,23	0,40	4,55	0,11	0,20	98,90	19,22	80,39	3,37
34		0,00	5,29	10,89	36,26	0,63	39,08	28,11	12,20	0,41	6,48	0,13	0,16	99,33	29,11	77,76	2,56
35		0,00	1,21	21,51	38,01	0,54	27,09	18,84	9,16	0,28	11,54	0,13	0,10	100,40	52,17	64,98	2,29
36	RN265-725	0,04	1,61	17,72	39,65	0,45	26,91	18,27	9,59	0,22	11,39	0,05	0,17	98,21	52,61	70,14	2,12
37		0,02	2,37	14,66	33,20	0,62	38,03	24,79	14,72	0,35	6,69	0,21	0,21	96,35	32,48	70,40	1,87
38		0,05	8,82	3,86	22,58	1,44	51,47	33,56	19,90	0,37	2,71	0,13	0,28	91,72	12,57	86,00	1,87
39	RN265-721	0,04	4,88	4,75	26,62	1,14	50,14	28,74	23,79	0,37	3,76	0,18	0,24	92,12	18,89	85,49	1,34
40		0,02	1,83	15,54	33,64	0,35	36,43	22,32	15,68	0,34	8,22	0,15	0,19	96,70	39,61	69,45	1,58
41		0,02	10,84	6,13	22,49	1,38	50,62	37,27	14,84	0,42	2,22	0,15	0,19	94,47	9,60	79,39	2,79
42	RN265-735	0,06	5,89	3,61	17,15	1,89	58,14	30,08	31,19	0,37	3,18	0,14	0,19	90,64	15,86	83,30	1,07
43		0,04	7,44	2,77	7,46	2,46	67,06	32,46	38,46	0,29	2,46	0,09	0,26	90,33	11,89	73,91	0,94

Содержание TiO₂ в этих разностях достигает 18 % при доле Fe²⁺ не более 0,2 форм. ед, что не описано в других объектах мира [Barnes, Roeder, 2001; Kamenetsky, Crawford, Meffre, 2001] и, по-видимому, является уникальным для пород верхнего эндоконтакта с МС-оруденением интрузии Норильск-1. Помимо Fe, Ti и Cr, некоторые различия обнаруживаются в концентрациях никеля. В низкомagneзиальных хром-

шпинелидах из вкрапленных сульфидных руд интрузии Норильск-1 наблюдается выраженный рост NiO в сравнении с МС-горизонтом. При этом, несмотря на то что поля на диаграмме NiO–Mg# для высокомагнезиальных хромшпинелидов из этих двух ассоциаций частично перекрываются, в целом концентрацию NiO в хромшпинелидах из МС-горизонта можно считать пониженной относительно вкрапленных

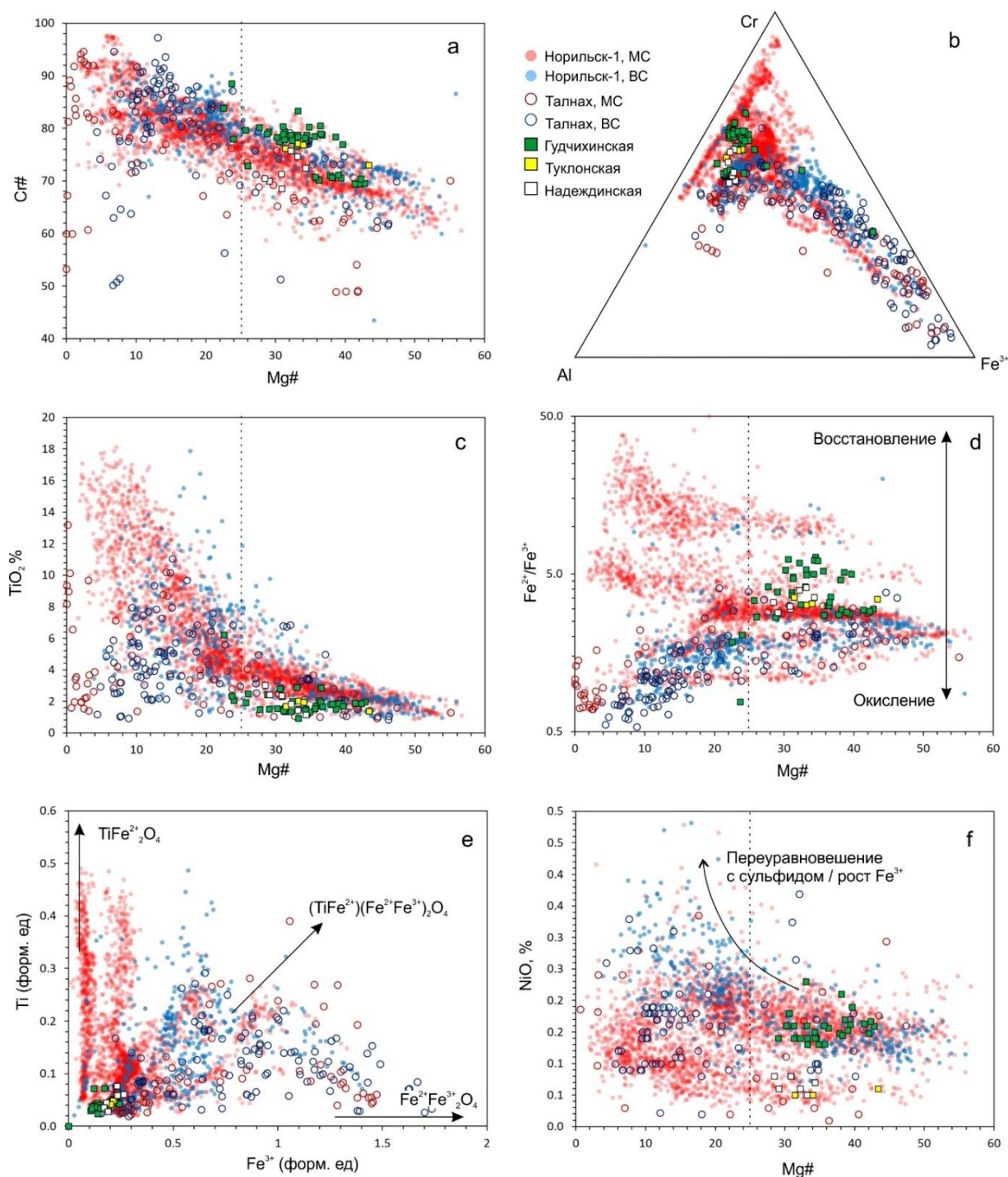


Рис. 5. Вариационные диаграммы составов хромшпинелидов из пород интрузии Норильск-1 и вулканических пород Норильского района

Источники данных: Норильск-1 – данная работа и [Chayka et al., 2020a, 2020b], Талнахская интрузия – [Barnes, Kunilov, 2000; Ryabov, Shevko, Gora, 2014; Гора, Шевко, Житова, 2012], пикробазальты гудчихинской свиты – [Соболев, Криволюцкая, Кузьмин, 2009] и данная работа, базальты туклонской и надеждинской свит – [Krivolutskaya et al., 2012, 2018]. Пунктирной линией на (a), (c), (d), (f) обозначена граница между условно-примитивными ($Mg\# > 25$) и переуравновешенными хромшпинелидами (см. текст)

Fig. 5. Variation diagrams with plotted compositions of Cr-spinels from the rocks of the Noril'sk-1 intrusion and volcanic rocks of the Noril'sk area

Data sources: Noril'sk-1 – this study and [Chayka et al., 2020a, 2020b], Talnakh intrusion – [Barnes, Kunilov, 2000; Ryabov, Shevko, Gora, 2014; Gora, Shevko, Zhitova, 2012], picobasalts of the Gudchikhinskiy formation - [Sobolev, Krivolutsкая, Kuz'min, 2009] and this study, basalts of the Tuklonskiy and Nadezhdinskiy Formations - [Krivolutskaya et al., 2012, 2018]. Dashed line on (a), (c), (d), (f) distinguishes between relatively primitive ($Mg\# > 25$) and re-equilibrated Cr-spinel compositions

сульфидных руд (см. рис. 5, f). Хромшпинелиды из пикробазальтов гудчихинской свиты имеют сравнительно низкую магнезиальность ($Mg\#$ от 28 до 42) по сравнению с хромитами из других вулканитов мира [Kamenetsky, Crawford, Meffre, 2001]. Их состав эволюционирует лишь в сторону понижения $Mg\#$, практически без изменения концентраций трехвалентных катионов и Ti (см. рис. 5). В редких случаях в краевой части зерен хромшпинелидов находятся тонкие оторочки хромистого магнетита, которые из-за размера нельзя проанализировать количественно.

Обсуждение результатов

Посткристаллизационное переуравновешение оливина и хромшпинелидов. Сравнительно высокая подвижность катионов (особенно двухвалентных) в решетке оливина и шпинелидов обуславливает способность этих минералов существенно изменять свой состав после образования. В оливине наиболее подвижными являются Mg, Fe, Mn, в меньшей степени – Ni и Ca [Petry, Chakraborty, Palme, 2004]. В хромшпинели весьма подвижны Mg и Fe^{2+} , в то время как трехвалентные катионы диффундируют медленнее, но при магматических температурах полное переуравновешение происходит менее чем за 200 лет [Coulthard Jr et al., 2021]. Вследствие диффузии оливин и шпинелиды в интрузивных породах, хотя и являются раннемагматическими, почти не сохраняют первичные составы в точности. Их состав и физико-химические параметры, которые по нему оцениваются, в действительности отвечают параметрам в момент «закрытия равновесной системы», т.е. либо в момент закалки породы (излияния на поверхность с быстрым застыванием), либо в момент, когда температура понизилась настолько, что эффектами диффузии, логарифмически зависящими от температуры, можно пренебречь.

В рассматриваемом случае мы предполагаем, что оливин из пород интрузии Норильск-1 существенно переуравновешивался, как минимум с окружающим расплавом. На диаграмме NiO– $Mg\#$ среди оливина из вкрапленных сульфидных руд отчетливо выделяется группа анализов с очень узким диапазоном $Mg\#$ при более широких вариациях NiO, что характерно для диффузионного выравнивания составов и переуравновешения в интрузивных породах (см. рис. 4, а) [Sobolev et al., 2009]. Принимая оливины с максимальным $Mg\#$ как наиболее примитивные для изученных пород, мы предполагаем, что раннемагматический оливин для пород с вкрапленными сульфидными рудами имел $Mg\#$ не менее 77,5, а для пород МС-горизонта – более 81 (см. рис. 4, а). Кроме этого, обратная корреляция в паре NiO– $Mg\#$ для оливина

из вкрапленных сульфидных руд, на наш взгляд, отражает переуравновешение оливина, находившегося в контакте с сульфидной жидкостью, – явление, описанное для полнокристаллических основных и ультраосновных пород с богатой Ni ликвационной сульфидной минерализацией (см. рис. 4, а) [Barnes et al., 2011, 2013].

Зерна хромшпинелида в изученных породах активно переуравновешивались с окружающим расплавом, с минералом-хозяином и, вероятно, с флюидами на постмагматическом этапе [Chayka et al., 2020a, 2020b]. Сильное переуравновешение с оливином следует из составов оливин-хромшпинелевых пар, которые только в пикробазальтах гудчихинской свиты попадают в экспериментально-определенную область высокотемпературного оливин-шпинелевого равновесия [Nikolaev et al., 2016], тогда как в породах с вкрапленной сульфидной минерализацией и МС-горизонте оливин-хромшпинелевая пара по Fe и Mg полностью переуравновешена (рис. 6, а). То же самое справедливо и для клинопироксен-хромшпинелевого равновесия, а зерна хромшпинелида в плагиоклазе лучше сохраняют изначальное Mg/Fe соотношение, поскольку, во-первых, Mg и Fe являются слабо совместимыми для плагиоклаза, а во-вторых, миграция этих катионов через плагиоклаз более медленная, чем через оливин и пироксен. Тем не менее составы хромшпинели в породах МС-горизонта ближе к равновесным составам, чем во вкрапленных рудах (см. рис. 6, а), что, вероятно, указывает на их более быстрое остывание в ходе магматического этапа по сравнению с последними. Таким образом, опираясь на составы хромшпинели из вулканических пород Норильского района Сибирских траппов [Krivolutskaya et al., 2012, 2018; Соболев, Криволуцкая, Кузьмин, 2009], составы быстро закаленных оливин-шпинелевых пар в базальтах и пикритах мира [Kamenetsky, Crawford, Meffre, 2001] и составы включений хромшпинелида в неизменном плагиоклазе [Chayka et al., 2020a], мы определяем нижнюю границу «первичных составов» хромшпинелида в изученных породах на уровне $Mg\# = 25$ (см. рис. 5, а–е).

Исходные магмы для рудоносных пород интрузии Норильск-1. По мере изучения пород Норильского комплекса и серии трапповых базальтов неоднократно поднимался вопрос о родоначальном расплаве (или родоначальных расплавах) для интрузий Норильского типа. Поскольку доминирующей теорией образования этих рудоносных интрузий является теория «проточной камеры» [Naldrett et al., 1992; Радько, 1991], то в большинстве случаев задача об исходных расплавах сводится к вопросу об их комагматичности конкретным свитам базальтов.

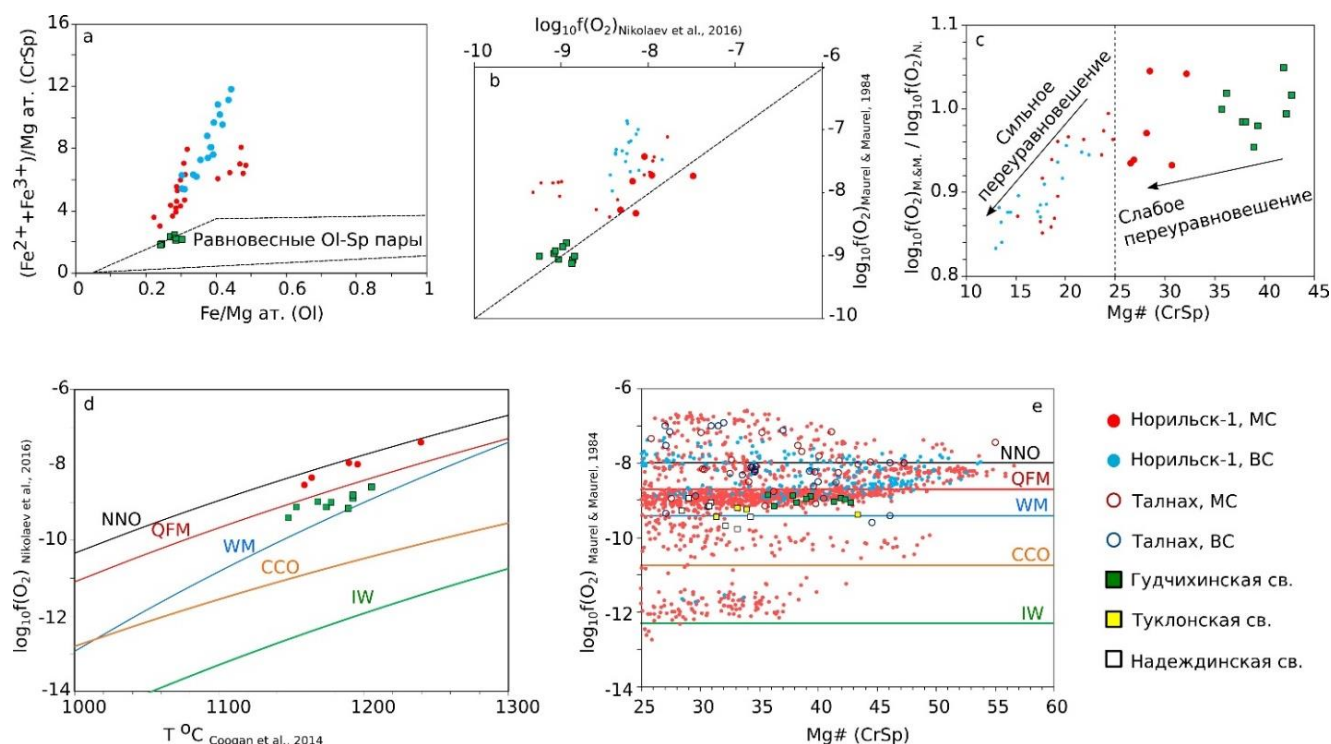


Рис. 6. Диаграммы с оценками физико-химических параметров кристаллизации оливин-хромшпинелевых пар из изученных пород

(a) вариационная диаграмма для оценки «первичности» оливин-хромшпинелевого равновесия по [Nikolaev et al., 2016]; (b, c) сравнение значений $\log_{10}f(\text{O}_2)$, полученных для оливин-хромшпинелевых пар изученных пород с помощью оливин-шпинелевого оксибарометра [Nikolaev et al., 2016] и оценки, основанной на $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ в хромшпинелиде [Fudali, 1965; Maurel, Maurel, 1984] (более мелкие маркеры – хромшпинелиды с $\text{Mg\#} < 25$); (d) T - $\log_{10}f(\text{O}_2)$ диаграмма для оливин-хромшпинелевых пар из пикробазальтов Гудчихинской свиты и MC-горизонта интрузии Норильск-1; (e) – оценки $\log_{10}f(\text{O}_2)$ по отношению $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ для условно-примитивных ($\text{Mg\#} > 25$) хромшпинелидов из пород Норильского района при $T = 1175^\circ\text{C}$ (источники данных – как на рис. 4). На (d) и (e) линии буферов рассчитаны по уравнениям из следующих источников: QFM и IW – [O'Neill, 1987a], NNO – [O'Neill, 1987b], WM – [Myers, Eugster, 1983], CCO – [Jakobsson, Oskarsson, 1994]

Fig. 6. Plots with estimations of physicochemical conditions of the olivine-Cr-spinel pair crystallization from the studied rocks

(a) variational plot utilized to distinguish “primitive” compositions of olivine-spinel pair [Nikolaev et al., 2016]; (b, c) comparison of $\log_{10}f(\text{O}_2)$ values, obtained for the olivine-Cr-spinel pairs from the studied rocks with the olivine-spinel oxybarometer [Nikolaev et al., 2016] and estimations based on $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ratio in Cr-spinel [Fudali, 1965; Maurel, Maurel, 1984] (small points are for Cr-spinel with $\text{Mg\#} < 25$); (d) T - $\log_{10}f(\text{O}_2)$ plot for the olivine-Cr-spinel pairs from microbasalts of the Gudchikhinskiy Formation and sulfide poor horizon of the Noril'sk-1 intrusion (e) – estimations of $\log_{10}f(\text{O}_2)$ based on $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ratio for relatively primitive ($\text{Mg\#} > 25$) Cr-spinels from the rocks of the Noril'sk area at $T = 1175^\circ\text{C}$ (data sources as on Fig. 4). Sources for buffer lines on (d) and (e): QFM and IW – [O'Neill, 1987a], NNO – [O'Neill, 1987b], WM – [Myers, Eugster, 1983], CCO – [Jakobsson, Oskarsson, 1994]

На основании геолого-структурных и геохимических признаков предполагалось, что интрузии Норильского типа комагматичны базальтам гудчихинской / туклонской [Золотухин, Виленский, Дюжиков, 1986], надеждинской [Naldrett et al., 1992], моронговской [Arndt et al., 2003; Fedorenko, 1994; Latyshev et al., 2020; Li, Ripley, Naldrett, 2009] или мокулаевской [Радько, 1991; Радько, 2016] свит. Однако в рамках этой точки зрения труднообъяснимы были различия в изотопном составе S и Os между интрузиями и базальтами [Arndt et al., 2003; Krivolutskaia, 2016; Lightfoot, Keays, 2005; Ripley et al., 2003]. Далее

Н.А. Криволюцкой было показано, что Масловская интрузия Норильского типа пересекает свиты базальтов от ивакинской до Надеждинской [Krivolutskaia, 2016], и, таким образом, получила подтверждение гипотеза, что рудоносные интрузии комагматичны базальтам моронговской свиты. Однако в базальтах моронговской свиты обнаруживаются небольшие интрузивные тела, геохимические характеристики которых близки интрузиям Норильского типа [Krivolutskaia, 2016], что указывает на то, что становление рудоносных интрузий продолжалось и в постморонговское время, и базальты мокулаевской свиты так-

же могут считаться их потенциальными комагматами. В то же время U-Pb датировки цирконов из интрузий Норильского типа покрывают широкий диапазон возрастов от 265 до 230 млн лет [Malitch et al., 2012], захватывая все время становления Сибирских траппов [Ivanov et al., 2013], а основанные на фазовых равновесиях физико-химические реконструкции для интрузий Норильского типа ставят под сомнение их комагматичность толеитовым базальтам и требуют более высокомагнезиальных родоначальных расплавов [Latypov, 2007, 2002]. Для того чтобы устранить противоречия, связанные с моделью «классической проточной камеры» [Naldrett et al., 1992], были сформулированы гипотезы, согласно которым интрузии Норильского типа формировались в течение долгого времени с участием разных магм [Czamanske et al., 1994; Yao, Mungall, 2021] или эти интрузии могли вообще не иметь отношения к трапповым базальтам, представленным в разрезе Норильского района, а сформироваться при дифференциации отдельного внедрения магмы [Krivolutskaya, 2016; Latypov, 2002]. Таким образом, учитывая возможность «не-проточного» формирования интрузий Норильского типа или отсутствия их непосредственных комагматов среди вышележащих базальтов, решение, по-видимому, должно находиться путем либо независимой оценки состава родоначальных магм [Krivolutskaya, 2011, 2016], либо путем сравнения геохимии и минералогии интрузий со всеми эффузивами Норильского района Сибирской LIP.

Полученные данные по составу оливина из интрузии Норильск-1 обнаруживают существенные отличия от оливина из пород Сибирских траппов (см. рис. 4). Содержания NiO в нем существенно выше, чем в оливине из базальтов туклонской и надеждинской свит, и несколько ниже, чем в пикробазальтах гудчихинской свиты. Отмечается, однако, что наиболее богатые NiO оливины из пикритовых габбродолеритов с вкрапленной сульфидной минерализацией перекрываются с областью составов оливина гудчихинской свиты. По соотношению $Mg\#-MnO$ оливины Норильска-1, наоборот, ближе туклонским и надеждинским базальтам. Вариации в системе $MgO-FeO-MnO-NiO$ показывают, что наиболее примитивные составы оливина Норильска-1 лежат также между полями гудчихинских и туклонских / надеждинских пород. Кроме этого, соотношения между критериями $Ni/(Mg/Fe)$ и Mn/Fe , которые компенсируют различия состава, вызванные эволюцией и переуравновешением оливина по $Mg-Fe$ изоморфной паре, и используются для определения специфики мантийного источника [Sobolev et al., 2007], показывают, что оливины из МС-горизонта и вкрапленных сульфидных руд могли кристаллизо-

ваться из химически различных порций магмы или при существенно разных условиях (см. рис. 4, d). Следует также отметить, что оливин интрузии Норильск-1 во многом близок анализам оливина из базальтов мокулаевской свиты, однако составы последнего широко варьируют, особенно по Mn, что не позволяет провести более детальное сравнение (см. рис. 4).

Поскольку в рассматриваемом случае главным контрастирующим элементом между составами оливина является Ni, следует отметить, что при отделении сульфидного расплава силикатная часть обедняется никелем благодаря его выраженно-халькофильным свойствам. В этом случае, если отделение сульфида происходит до или во время кристаллизации оливина, концентрация Ni в оливине, кристаллизующемся из силикатного расплава, закономерно уменьшится. Вместе с этим в случае соседства оливина с сегрегацией высоко-Ni сульфидного расплава на поздних этапах кристаллизации пород первый будет обогащаться Ni, поскольку высокий коэффициент распределения в системе сульфид–оливин будет частично компенсирован высокой концентрацией Ni в сульфидной жидкости [Barnes et al., 2013]. Таким образом, в сульфид-насыщенных системах Ni в оливине ведет себя двойственно: падает на ранних этапах кристаллизации и растет вместе с Fe – на поздних. Если же изученные породы формировались из магм, близких к базальтам надеждинской и туклонской свит, различия в содержании Ni можно было бы объяснить последующим повсеместным переуравновешением Ol с сульфидным расплавом и ростом Ni. С другой стороны, если исходный расплав был близок родоначальному для пикробазальтов гудчихинской свиты, то полученные составы оливина из интрузии Норильск-1 отражают сначала падение Ni при насыщении расплава S и отделении сульфида, а затем – рост при позднемагматическом переуравновешении (см. рис. 4, а, с). Поскольку оливин Норильска-1 все-таки ближе к составам, характерным для гудчихинской свиты, тогда как между ним и оливином туклонской / надеждинской свит есть существенный разрыв (см. рис. 4), есть основания предположить, что высокомагнезиальные, высоко-Ni магмы, подобные гудчихинским пикробазальтам, могли принимать участие в образовании интрузии Норильск-1. Кроме этого, следует более детально рассмотреть оливин из толеитовых базальтов мокулаевской свиты, поскольку, по предварительным данным, он может быть еще более близок к составам оливина Норильска-1, чем оливин из гудчихинской свиты.

Условно-примитивные ($Mg\# > 25$) хромшпинелиды из трапповых эффузивов и интрузий Норильско-

го типа не обнаруживают таких контрастов состава, как оливины. По соотношениям главных компонентов (Cr, Al, Mg, Fe, Ti) составы хромшпинелидов из эффузивов Норильского района близки друг другу и большинству примитивных хромшпинелидов интрузий Норильск-1 и Талнахская, за исключением отношения $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, которое является индикатором окислительно-восстановительных условий и будет детально рассмотрено ниже. Тем не менее хромшпинелиды из интрузии Норильск-1 обогащены Ni по отношению к хромитам надеждинской и туклонской свит и по этому признаку, кроме нескольких образцов МС-горизонта (имеющих также аномально повышенное $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ отношение), перекрываются с хромитами гудчихинской свиты (см. рис. 5, f). Таким образом, данные по составу хромита подтверждают, что на раннем этапе кристаллизации породы интрузии Норильск-1 силикатная составляющая магм была обогащена Ni и по этому признаку была схожа с пикробазальтами гудчихинской свиты. Также, по-видимому, большая часть хромита образовалась еще до силикатно-сульфидной ликвации.

T-f(O₂) параметры образования пород интрузии Норильск-1. Составы сосуществующих оливина и хромшпинели в магматических, мантийных и метаморфических породах изменяются в зависимости от физико-химических условий, и по этим составам можно рассчитать температуру, давление и окислительно-восстановительные условия среды на момент последнего равновесия в системе оливин–шпинель ($\pm$ пироксен) [Ballhaus, Berry, Green, 1991; Coogan, Saunders, Wilson, 2014; Nikolaev et al., 2016]. Однако если для вулканических пород этим методом с достаточной надежностью можно определить истинную температуру магмы на момент излияния или даже кристаллизации самих минералов, то для интрузивных пород из-за их длительного остывания и диффузии полученные температуры нельзя рассматривать как температуру кристаллизации (см. выше). Тем не менее, поскольку результаты, полученные с использованием низкоподвижных элементов, должны больше соответствовать реальным температурам кристаллизации, мы рассчитали температуру оливин-шпинелевого равновесия методом Al-in-olivine термометра [Coogan, Saunders, Wilson, 2014] для пикробазальтов гудчихинской свиты и наименее переуравновешенных пар из МС-горизонта интрузии Норильск-1. Полученные температуры варьируют в пределах 1 150–1 210 °C для первых и от 1 150 до 1 240 – для вторых, что согласуется с оценками методом гомогенизации расплавных включений [Krivolutskaya, 2016; Соболев, Кривоуцкая, Кузьмин, 2009].

Определение окислительно-восстановительных параметров по оливин-шпинелевой паре основывается на обмене Fe и Mg между оливином, хромшпинелью и окружающей средой [Ballhaus, Berry, Green, 1991; Nikolaev et al., 2016], что затрудняет его применение для пород интрузии Норильск-1 из-за высокой подвижности Fe и Mg. С помощью метода [Nikolaev et al., 2016] мы оценили $f(\text{O}_2)$ для пикробазальтов гудчихинской свиты и нескольких условно-примитивных хромшпинелидов МС-горизонта, включенных в оливин, тогда как для вкрапленных руд этот метод не применялся из-за сильного оливин-хромшпинелевого переуравновешивания. Для пикробазальтов $\log_{10}f(\text{O}_2)$ составил от -9 до $-9,8$, для оливин-хромитовой пары МС-горизонта варьировал между -8 и -9 . Кроме оливин-хромшпинелевого термометра, предполагая, что породы интрузии Норильск-1 кристаллизовались из магм, по суммарному Fe подобных «среднему составу траппов» Норильского района (11,5–12,9 % FeO) [Krivolutskaya, 2011; Krivolutsкая, Rudakova, 2009] и рассчитанному родоначальному расплаву для Талнахской интрузии (11,4 % FeO) [Krivolutskaya, 2011], была использована полуколичественная оценка $f(\text{O}_2)$, основанная на $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ отношении в хромшпинелидах. Зная предположительное суммарное FeO в расплаве и предполагая $T = 1\,175$ °C, содержание Fe_2O_3 в хромшпинелиде пересчитывалось на $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ в равновесном расплаве [Maurel, Maurel, 1984], по которому затем с использованием эмпирической зависимости для базальтовых расплавов $\log_{10}f(\text{O}_2) = -4\log_{10}(\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3) + C$ (где $C = \text{const}$) [Fudali, 1965] рассчитывалось $f(\text{O}_2)$. Константа C была получена путем калибровки этой функции на данные оливин-шпинелевого оксидометра [Nikolaev et al., 2016] для пикробазальтов гудчихинской свиты (рис. 6, b). Сравнение значений, полученных двумя способами для всех проанализированных оливин-хромшпинелевых пар интрузии Норильск-1, показало удовлетворительную сходимость для хромшпинелидов с $\text{Mg\#} > 25$ (табл. 3), а при меньших $\text{Mg\#}$ значения стремительно расходились (рис. 6, b, c).

Таким образом, проведенные оценки T - $f(\text{O}_2)$ условий кристаллизации оливина и хромита из пикробазальтов гудчихинской свиты и пород интрузии Норильск-1 показали, что в пикробазальтах и МС-горизонте эти минералы кристаллизовались в интервале T 1 150–1 240 °C или выше (см. табл. 3, рис. 6, d). $\log_{10}f(\text{O}_2)$, оцененный по оливин-хромшпинелевой паре, для пикробазальтов варьировал в пределах QFM – QFM-0,5 (см. табл. 3, рис. 6, d). Вкрапленные сульфидные руды интрузии Норильск-1 кристаллизовались при $f(\text{O}_2)$ от $-7,5$ до -9 , что при 1 175 °C составляет $\sim \text{NNO} \pm 1$ и несколько повышено отно-

сительно пикробазальтов Гудчихинской свиты и оценок для пикробазальтов надеждинской и туклонской свит (рис. 6, е). Для МС-горизонта оценки $f(\text{O}_2)$ показали весьма различные значения для разных образцов. В большинстве $\log_{10}f(\text{O}_2)$ при 1 175 °C составлял около -9 , что близко к пикробазальтам гудчихинской свиты (см. рис. 6, е). Тем не менее некоторые образцы демонстрировали более окисленные условия (до $\log_{10}f(\text{O}_2) = -7$ или $\sim \text{QFM} + 2$), а ряд образцов, наоборот, до $\log_{10}f(\text{O}_2) = -12$, что для магматических пород является крайне восстановленной средой и близко к буферу IW (Fe-FeO) (см. рис. 6, е).

Следует отметить, что такие аномально-восстановленные значения являются уникальными для интрузии Норильск-1 и нехарактерны для пород верхнего эндоконтакта с МС-горизонтом для Талнахской интрузии, для которых оценки $\log_{10}f(\text{O}_2)$ не опускаются ниже WM (FeO-Fe₃O₄) буфера (см. рис. 6, е). Мы предполагаем, что такие вариации окислительно-восстановительных условий в МС-горизонте интрузии Норильск-1 связаны с интенсивной ассимиляцией углистых сланцев тунгусской свиты, что также находит отражение в составе включений в хромшпинелиде МС-горизонта [Chayka et al., 2020b].

Таблица 3

Представительные составы пар оливин–хромшпинелид из малосульфидных руд интрузии Норильск-1 и пикробазальтов гудчихинской свиты с рассчитанными по ним значениями T-f(O₂)

Table 3

Representative compositions of olivine-Cr-spinel pairs from sulfide-poor ores of the Noril'sk-1 intrusion and picrobasalts of the Gudchikhinskiy Formation with calculated T-f(O₂) values

Объект	МС-горизонт, Норильск-1					Пикробазальты, гудчихинская свита (Юж. Икэн)				
Образец	B16284			N19-10-2		B20104				
№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Оливин										
SiO ₂	39,82	39,87	39,23	38,78	38,71	39,27	39,24	38,68	39,26	38,79
TiO ₂	0,027	0,056	0,035	0,030	0,026	0,012	0,018	0,013	0,013	0,016
Al ₂ O ₃	0,025	0,012	0,023	0,024	0,022	0,032	0,036	0,029	0,030	0,032
Cr ₂ O ₃	0,075	0,415	0,079	0,356	0,087	0,048	0,072	0,046	0,062	0,063
MgO	41,72	42,81	39,77	40,73	39,97	40,70	41,72	40,26	41,86	40,18
FeO	17,94	17,00	20,27	20,08	20,41	19,77	18,40	20,63	18,19	20,32
MnO	0,283	0,284	0,328	0,330	0,336	0,253	0,241	0,263	0,240	0,265
NiO	0,251	0,278	0,247	0,215	0,220	0,262	0,272	0,252	0,278	0,251
CoO	0,023	0,022	0,025	0,022	0,024	0,026	0,026	0,026	0,025	0,026
ZnO	0,006	0,011	0,013	0,007	0,009	0,016	0,014	0,018	0,016	0,016
Na ₂ O	0,007	0,007	0,006	0,001	0,002	0,009	0,006	0,007	0,009	0,010
CaO	0,109	0,036	0,118	0,087	0,097	0,276	0,284	0,271	0,271	0,278
P ₂ O ₅	0,003	0,007	0,011	0,010	0,015	0,004	0,020	0,009	0,013	0,008
Mg#	80,56	81,78	77,76	78,33	77,72	78,58	80,15	77,66	80,39	77,89
Хромшпинелид										
SiO ₂	0,02	0,04	0,02	0,81	0,01	0,09	0,07	0,08	0,14	0,05
TiO ₂	3,16	3,35	4,19	1,71	2,36	2,07	1,86	1,89	1,96	1,73
Al ₂ O ₃	12,26	9,15	8,62	15,07	12,89	17,05	18,01	17,05	18,02	16,62
Cr ₂ O ₃	37,36	36,19	34,39	34,34	34,30	38,14	38,92	38,93	39,26	38,23
V ₂ O ₃	0,42	0,41	0,47	0,32	0,36	0,43	0,42	0,45	0,40	0,52
FeO*	36,56	40,58	41,63	38,26	41,01	31,64	30,13	31,27	29,53	32,74
FeO	25,35	25,54	26,53	26,75	26,60	24,01	22,27	23,04	22,14	23,96
Fe ₂ O ₃	12,46	16,70	16,78	12,79	16,01	8,49	8,74	9,15	8,21	9,75
MnO	0,39	0,42	0,44	0,43	0,42	0,27	0,26	0,26	0,26	0,29
MgO	6,76	6,36	5,93	5,88	5,50	7,66	9,05	8,41	9,29	7,48
ZnO	0,11	0,11	0,18	0,19	0,18	0,13	0,16	0,12	0,13	0,18
NiO	0,16	0,21	0,21	0,14	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,13
Mg#	32,22	30,72	28,49	28,16	26,93	36,26	41,99	39,40	42,78	35,74
Fe ²⁺ /Fe ³⁺	2,26	1,70	1,76	2,32	1,85	3,14	2,83	2,80	3,00	2,73
T °C [Coogan et al., 2014]	1196	1101	1239	1159	1164	1192	1205	1174	1168	1193
log ₁₀ (fO ₂) [Nikolaev et al., 2017]	-8,0	-8,3	-7,4	-8,5	-8,3	-8,9	-8,6	-9,1	-9,0	-8,8
Fe ₂ O ₃ распл [Maurel and Maurel., 1984]	1,45	1,95	1,95	1,49	1,86	0,99	1,02	1,07	0,96	1,14
log ₁₀ f(O ₂) [Fudali et al., 1965]	-8,3	-7,7	-7,7	-8,3	-7,8	-9,1	-9,0	-8,9	-9,1	-8,8

Заключение

Проведенное исследование оливина и хромшпинелидов из вкрапленных сульфидных и малосульфидных руд интрузии Норильск-1 и пикробазальтов Гудчихинской свиты, а также сравнение их с ранее опубликованными данными по другим вулканитам Норильского района и Талнахской интрузии показало следующее:

1. Оливин изученных пород характеризуется сравнительно низко-Mg# составом ($Mg\# < 84$ для пикробазальтов гудчихинской свиты и < 82 для пород других вулканитов и интрузии Норильск-1). По содержанию NiO оливин существенно варьирует, что связано с силикатно-сульфидной ликвацией – падение Ni, и поздним переуравновешением оливина с сульфидной жидкостью – рост Ni. Наиболее близки к оливину из интрузий составы этого минерала в гудчихинской и мокулаевской свитах.

2. Состав хромшпинелидов в изученных породах сильно варьирует, особенно для МС-горизонта интрузии Норильск-1, в котором наблюдается сильный разброс этих составов, главным образом из-за широких вариаций Fe^{2+}/Fe^{3+} отношения. По большинству компонентов наиболее примитивные ($Mg > 35-40$) составы хромшпинелидов интрузий Норильского

типа близки как между собой, так и к хромитам из вулканитов Норильского района, а по NiO – к пикробазальтам гудчихинской свиты. Однако при более низких Mg# диапазон составов начинает расходиться, а содержание TiO_2 увеличивается до 12–13 % во вкрапленных рудах и до 18 % в МС-горизонте Норильска-1. Полученные данные показывают, что вывод о существенном посткристаллизационном переуравновешении хромшпинелидов с вмещающими силикатами, сформулированный для МС-горизонта [Chayka et al., 2020a], справедлив и для вкрапленных сульфидных руд.

Породы вкрапленных сульфидных руд интрузии Норильск-1 кристаллизовались при $\log_{10}f(O_2)$ от -7 до -9 ($NNO + 1 - QFM$), а среда кристаллизации МС-горизонта характеризовалась весьма неоднородными окислительно-восстановительными условиями с вариациями $\log_{10}f(O_2)$ от -7 до -12 (от $NNO + 1$ до IW) при средних значениях для большинства образцов $-9 \pm 0,5$. Мы связываем резко-восстановленные условия в МС-горизонте интрузии Норильск-1 с контаминацией магмы углистым веществом. Таким образом, $f(O_2)$ для МС-горизонта приблизительно соответствует таковой для вулканитов Норильского района, а для вкрапленных сульфидных руд – несколько повышена.

Список источников

- Гора М., Шевко А., Житова Л. Оксидная рудная минерализация траппов: северо-запад Сибирской платформы. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 114 с.
- Дистлер В.В. Платиновая минерализация Норильских месторождений // Геология и генезис платиновых металлов. М. : Наука, 1994. С. 7–35.
- Золотухин В.В., Виленский А.М., Дюжиков О.А. Базальты Сибирской платформы. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1986. 246 с.
- Иванов М.К., Иванова Т.К., Тарасов А.В., Шатков В.А. Характеристики петрологии и рудной минерализации дифференцированных интрузий Норильского рудного узла (месторождения Норильск-1, Норильск-2 и г. Хромай) // Петрология и рудоносность Талнахских и Норильских дифференцированных интрузий / под ред. М.К. Додина, Д.А. Батуева, Б.Н. Иванова. Л. : Недра, 1971. С. 197–305.
- Надретт Э.Д. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб. : СПбГУ, 2003. 487 с.
- Радько В.А. Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1991. № 11. С. 19–27.
- Радько В.А. Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб. : Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 225 с.
- Служеникин С.Ф., Дистлер В.В., Дюжиков О.А., Кравцов В.Ф., Кунилов В.Е., Лапутина И.П., Туровцев Д.М. Мало-сульфидное платиновое оруденение в норильских дифференцированных интрузивах // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36, № 3. С. 195–217.
- Соболев А.В., Криволицкая Н.А., Кузьмин Д.В. Петрология родоначальных расплавов и мантийных источников магм Сибирской трапповой провинции // Петрология. 2009. Т. 17, № 3. С. 276–310.
- Струнин Б.М., Дюжиков О.А., Бармина О.А., Комаров В.В. Геологическая карта Норильского района масштаба 1:200 000. М. : Геоинформмарк, 1994.
- Туровцев Д.М. Контактный метаморфизм Норильских интрузий. М. : Научный мир, 2003. 319 с.
- Урванцев Н.Н. Некоторые вопросы формирования рудоносных интрузий и руд Норильска // Медно-никелевые руды Талнахского рудного узла. Л. : НИИГА, 1972. С. 100–105.
- Arndt N.T., Czamanske G.K., Walker R.G., Chauvel C., Fedorenko V.A. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits // Econ. Geol. 2003. V. 98 (3). P. 495–515.
- Ballhaus C., Berry R.F., Green D.H. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geo-barometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // Contrib. to Mineral. Petrol. 1991. V. 107 (1). P. 27–40.

- Barnes S.J., Godel B., Güler D., Brenan J.M., Robertson J., Paterson D.** Sulfide-olivine Fe-Ni exchange and the origin of anomalously Ni rich magmatic sulfides // *Econ. Geol.* 2013. V. 108 (8). P. 1971–1982.
- Barnes S.J., Kunilov V.Y.** Spinel and Mg ilmenites from the Noril'sk 1 and Talnakh intrusions and other mafic rocks of the Siberian flood basalt province // *Econ. Geol.* 2000. V. 95 (8). P. 1701–1717.
- Barnes S.J., Osborne G.A., Cook D., Barnes L., Maier W.D., Godel B.** The Santa Rita nickel sulfide deposit in the Fazenda Mirabela intrusion, Bahia, Brazil: Geology, sulfide geochemistry, and genesis // *Econ. Geol.* 2011. V. 106 (7). P. 1083–1110.
- Barnes S.J., Roeder P.L.** The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks // *J. Petrol.* 2001. V. 42 (12). P. 2279–2302.
- Batanova V.G., Sobolev A.V., Magnin V.** Trace element analysis by EPMA in geosciences: Detection limit, precision and accuracy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering/ IOP Publishing*, 2018. V. 304 (1). Art. 012001.
- Batanova V.G., Sobolev A.V., Kuzmin D.V.** Trace element analysis of olivine: High precision analytical method for JEOL JXA-8230 electron probe microanalyser // *Chem. Geol.* 2015. V. 419. P. 149–157.
- Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Zhitova L.M., Izokh A.E., Tolstykh N.D., Abersteiner A., Lobastov B.M., Yakich T.Yu.** Hybrid Nature of the Platinum Group Element Chromite-Rich Rocks of the Noril'sk 1 Intrusion: Genetic Constraints from Cr Spinel and Spinel-Hosted Multiphase Inclusions // *Econ. Geol.* 2020b. V. 115 (6). P. 1321–1342.
- Chayka I.F., Zhitova L.M., Antsiferova T.N., Abersteiner A., Shevko A.Ya., Izokh A.E., Tolstykh N.D., Gora M.P., Chubarov V.M., Kamenetsky V.S.** In-situ crystallization and continuous modification of chromian spinel in the “sulfide-poor platinum-group metal ores” of the Noril'sk-1 intrusion (Northern Siberia) // *Minerals*. 2020a. V. 10. P. 498.
- Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N.** Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // *Chem. Geol.* 2014. V. 368. P. 1–10.
- Coulthard Jr D.A., Zellmer G.F., Tomiya A., Jégo S., Brahm R.** Petrogenetic implications of chromite-seeded boninite crystallization experiments: Providing a basis for chromite-melt diffusion chronometry in an oxybarometric context // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2021. V. 297. P. 179–202.
- Czamanske G.K., Wooden J.L., Zientek M.L., Fedorenko V.A., Zen'ko T.E., Kent J., King B.W., Knight R.J., Siems D.F.** Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of the Noril'sk-Talnakh ore-forming system // *Proc. Sudbury–Noril'sk Symp. Ontario*, 1994. P. 313–343.
- Distler V.V., Kunilov V.E.** Geology and ore deposits of the Noril'sk Region // *Seventh International Platinum Symposium (Moscow–Noril'sk) : Field Trip Guidebook*. 1994.
- Distler V.V., Sluzhenikin S.F., Cabri L.J., Krivolutskaya N.A., Turivtsev D.M., Golovanova T.A., Mokhov A.V., Knauf V.V., Oleshkevich O.I.** Platinum Ores of the Noril'sk Layered Intrusions: Magmatic and Fluid Concentration of Noble Metals // *Geol. Ore Depos.* 1999. V. 41 (3). P. 214–237.
- Droop G.V.R.** A general equation for estimating Fe 3+ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria // *Mineral. Mag.* 1987. V. 51 (361). P. 431–435.
- Duzhikov O.A., Distler V.V., Rylkova G., Naldrett A.J.** *Geology and Metallogeny of Sulfide Deposits Noril'sk Region USSR*. Cleveland, OH : Society of Economic Geologists, 1992.
- Fedorenko V.A.** Model of genetic relationship between flood basalts, ore-bearing intrusions and Cu–Ni–Pt ores in the Noril'sk region, NW Siberian platform, Russia, abstr 26 // *International Platinum Symposium, 12th, Moscow, August 1–4, 1994 : Abstracts*. 1994. P. 26.
- Fudali R.F.** Oxygen fugacities of basaltic and andesitic magmas // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1965. V. 29 (9). P. 1063–1075.
- Genkin A.D., Evstigneeva V.L.** Associations of platinum-group minerals of the Noril'sk copper-nickel sulfide ores // *Econ. Geol.* 1986. V. 81 (5). P. 1203–1212.
- Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Palevskii S.V., Nikolaeva I.V.** Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism // *Earth-Science Rev.* 2013. V. 122. P. 58–76.
- Jakobsson S., Oskarsson N.** The system CO in equilibrium with graphite at high pressure and temperature: An experimental study // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1994. V. 58 (1). P. 9–17.
- Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S.** Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks // *J. Petrol.* 2001. V. 42 (4). P. 655–671.
- Krivolutskaya N.A.** Formation of PGM-Cu-Ni deposits in the process of evolution of flood-basalt magmatism in the Noril'sk region // *Geol. Ore Depos.* 2011. V. 53 (4). P. 309–339.
- Krivolutskaya N.A.** *Siberian Traps and Pt-Cu-Ni deposits in the Noril'sk area*. Springer, 2016. 364 p.
- Krivolutskaya N.A., Kuzmin D.V., Gongalsky B.I., Roschina I.A., Kononkova N.N., Svirskaya N.M., Romashova T.V.** Stages of Trap Magmatism in the Noril'sk Area: New Data on the Structure and Geochemistry of the Volcanic Rocks // *Geochemistry Int.* 2018. V. 56 (5). P. 419–437.
- Krivolutskaya N.A., Rudakova A.V.** Structure and geochemical characteristics of trap rocks from the Noril'sk trough, Northwestern Siberian Craton // *Geochemistry Int.* 2009. V. 47 (7). P. 675–698.
- Krivolutskaya N.A., Sobolev A.V., Mikhailov V.N., Plekhova A.A., Kostitsyn Yu.A., Roschina I.A., Fekiasova Z.** Parental melt of the Nadezhdinsky Formation: Geochemistry, petrology and connection with Cu-Ni deposits (Noril'sk area, Russia) // *Chem. Geol.* 2012. V. 302. P. 87–105.
- Latypov R.M.** Phase equilibria constraints on relations of ore-bearing intrusions with flood basalts in the Noril'sk region, Russia // *Contrib. to Mineral. Petrol.* 2002. V. 143 (4). P. 438–449.
- Latypov R.** Noril'sk-and Lower Talnakh-type intrusions are not conduits for overlying flood basalts: insights from residual gabbroic sequence of intrusions // *Appl. Earth Sci.* 2007. V. 116 (4). P. 215–225.
- Latyshev A.V., Rad'ko V.A., Veselovskiy R.V., Fetisova A.M., Pavlov V.E.** Correlation of the Permian-Triassic Ore-Bearing Intrusions of the Noril'sk Region with the Volcanic Sequence of the Siberian Traps Based on the Paleomagnetic Data // *Econ. Geol.* 2020. V. 115 (6). P. 1173–1193.

- Li C., Ripley E.M., Naldrett A.J. A new genetic model for the giant Ni-Cu-pge sulfide deposits associated with the Siberian flood basalts // *Econ. Geol.* 2009. V. 104 (2). P. 291–301.
- Lightfoot P.C., Keays R.R. Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian trap, Noril'sk region: Implications for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores // *Econ. Geol.* 2005. V. 100 (3). P. 439–462.
- Likhachev A.P. Ore-bearing intrusions of the Noril'sk region // *Proc. Sudbury–Noril'sk Symp. Ontario*, 1994. P. 185–202.
- Malitch K.N., Badanina I.Yu., Belousiva E.A., Tuganova E.V. Results of U-Pb dating of zircon and baddeleyite from the Noril'sk-1 ultramafic-mafic intrusion (Russia) // *Russ. Geol. Geophys.* 2012. V. 53. P. 123–130.
- Maurel C., Maurel P. Etude expérimentale de la distribution du fer ferrique entre spinelle chromifère et bain silicaté basique // *Bull. minéralogie*. 1984. V. 107 (1). P. 25–33.
- Myers J.T., Eugster H.P. The system Fe-Si-O: Oxygen buffer calibrations to 1,500 K // *Contrib. to Mineral. Petrol.* 1983. V. 82 (1). P. 75–90.
- Naldrett A.J., Asif M., Gorbachev N.S., Kunilov V.Y., Stekhin A.I., Fedorenko V.A., Lightfoot P.C. The composition of the Ni-Cu ores of the Oktaybr'sky deposit // *Noril'sk Reg. Ontario Geol. Surv. Spec.* 1994. V. 5. P. 357–371.
- Naldrett A.J., Lightfoot P.C., Fedorenko V., Doherty W., Gorbachev N.S. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk region, USSR, with implications for the origin of the Ni-Cu ores // *Econ. Geol.* 1992. V. 87. P. 975–1004.
- Nikolaev G.S., Ariskin A.A., Barmina G.S., Nazarov M.A., Almeev R.R. Test of the Ballhaus–Berry–Green Ol–Opx–Sp oxybarometer and calibration of a new equation for estimating the redox state of melts saturated with olivine and spinel // *Geochemistry Int.* 2016. V. 54 (4). P. 301–320.
- O'Neill H.S.C. Free energies of formation of NiO, CoO, Ni₂SiO₄, and Co₂SiO₄ // *Am. Mineral.* 1987b. V. 72 (3–4). P. 280–291.
- O'Neill H.S.C. Quartz-fayalite-iron and quartz-fayalite-magnetite equilibria and the free energy of formation of fayalite (Fe₂SiO₄) and magnetite (Fe₃O₄) // *Am. Mineral.* 1987a. V. 72 (1–2). P. 67–75.
- Petry C., Chakraborty S., Palme H. Experimental determination of Ni diffusion coefficients in olivine and their dependence on temperature, composition, oxygen fugacity, and crystallographic orientation // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. V. 68 (20). P. 4179–4188.
- Ripley E.M., Lightfoot P.C., Li C., Elswick E.R. Sulfur isotopic studies of continental flood basalts in the Noril'sk region: Implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2003. V. 67 (15). P. 2805–2817.
- Ryabov V.V., Shevko A.Y., Gora M.P. Trap magmatism and ore formation in the Siberian Noril'sk region. Springer, 2014. 625 p.
- Sluzhenikin S.F., Yudovskaya M.A., Barnes S.J., Abramova V.D., Le Valliant M., Petrenko D.B., Grigor'eva A.V., Brovchenko V.D. Low-Sulfide Platinum Group Element Ores of the Norilsk-Talnakh Camp // *Econ. Geol.* 2020. V. 115 (6). P. 1267–1303.
- Sobolev A.V., Hoffman A.W., Kuzmin D.V., Yaxley G.M., Arnd N.T., Chung S.-L., Danyushevskiy L.V., Elliott T., Frey F.A., Garcia M.O. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // *Science*. 2007. V. 316 (5823). P. 412–417.
- Sobolev A.V., Sobolev S.V., Kuzmin D.V., Malitch K.N., Petrunin A.G. Siberian meimechites: origin and relation to flood basalts and kimberlites // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. V. 50. P. 999–1033.
- Tolstykh N.D., Zhitova L.M., Shapovalova M.O., Chayka I.F. The evolution of the ore-forming system in the low sulfide horizon of the Noril'sk 1 intrusion, Russia // *Mineral. Mag.* 2019. V. 83 (5). P. 673–694.
- Tolstykh N., Krivolutsкая N., Safonova I., Shapovalova M., Zhitova L., Abersteiner A. Unique Cu-rich sulphide ores of the Southern-2 orebody in the Talnakh Intrusion, Noril'sk area (Russia): Geochemistry, mineralogy and conditions of crystallization // *Ore Geol. Rev.* 2020. V. 122. Art. 103525.
- Yao Z., Mungall J.E. Linking the Siberian Flood Basalts and Giant Ni-Cu-PGE Sulfide Deposits at Norilsk // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2021. V. 126 (3). e2020JB020823.

References

- Gora M., Shevko A., Zhitova L. [Oksidnaya rudnaya mineralizatsiya trappov: Severo-zapad Sibirskoy platformy] Oxide ore mineralization of traps: North-Western Siberian Platform. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 114 p. In Russian
- Distler V.V. *Platinovaya mineralizatsiya Noril'skikh mestorojdeniy* [Platinum mineralization of the Noril'sk deposits] // *Geology and genesis of platinum metals*. Moscow: Nauka. 1994. pp. 7–35. In Russian
- Zolotukhin V.V., Vilenskiy A.M., Duzhikov O.A. *Bazal'ty Sibirskoy platformy* [Basalts of Siberian platform]. Novosibirsk, Siberian branch, 1986. 246 p. In Russian
- Ivanov M.K., Ivanova T.K., Tarasov A.V., Shatkov V.A. *Kharakteristiki petrologii i rudnoi mineralizatsii differentsirovannykh intruzii Noril'skogo rudnogo uzla (Mestorozhdeniya Noril'sk-1, Noril'sk-2 and g. Khromaya)* [Characteristics of petrology and ore mineralization of differentiated intrusions of the Noril'sk ore junction (Noril'sk-1, Noril'sk-2 and mnt. Khromaya deposits)] // *Petrology and ore potential of Talnakh and Noril'sk differentiated intrusions* / eds. M.K. Dodin, D.A. Batuyev, B.N. Ivanov.: Leningrad: Nedra, 1971. pp. 197–305. In Russian
- Naldrett E.J. *Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration*. Springer, 2004. 703 p.
- Rad'ko V.A. *Model' dinamicheskoy differentsiatsii intruzivnykh trappov severo-zapada Sibirskoy platformy* [A model of dynamic differentiation of intrusive traps of the North-Western Siberian Platform] // *Geologiya i Geofizika*. 1991. V. 11, pp. 19–27. In Russian
- Rad'ko V.A. *Fatsii intruzivnogo i effuzivnogo magmatizma Noril'skogo raiona* [Facies of intrusive and effusive magmatism of the Noril'sk region]. St. Petersburg: VSEGEI, 2016.
- Sluzhenikin S., Distler V., Dyuzhikov O., Kravtsov V., Kunilov V., Laputina I., Turovtsev D. *Malosul'fidnoye platinovoye orudneniye v noril'skikh differentsirovannykh intruzivakh* [Low sulfide platinum mineralization in the Noril'sk differentiated intrusive bodies] // *Geologiya Rudnykh Mestorozhdeniy*, V. 36. pp. 195–217. In Russian
- Sobolev A.V., Krivolutsкая N.A., Kuzmin D.V. Petrology of the parental melts and mantle sources of Siberian trap magmatism // *Petrology*, V. 17(3), pp. 253–286.

- Strunin B.M., Duzhikov O.A., Barmina O.A., Komarov V.V. *Geologicheskaya karta Noril'skogo raiona mashtaba 1:200000* [Geological map of the Noril'sk region 1:200000]. Moscow : AO Geoinformark, 1994. In Russian
- Turovtsev D. *Kontaktoviy metamorfizm noril'skikh intruziy* [Contact Metamorphism of the Noril'sk Intrusions] Moscow : Nauchnyi mir, 2002. 319 p. In Russian.
- Urvantsev N. *Nekotorye voprosy formirovaniya rudonosnykh intruziy I rud Noril'ska* [Some questions on formation of ore-bearing intrusion and Cu-Ni ores of Talnakh ore junction] // Cooper-Nickel ores of the Talnakh ore junction, Leningrad, Nedra, pp. 100–105. In Russian.
- Arndt N.T., Czamanske G.K., Walker R.G., Chauvel C., Fedorenko V.A. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits // *Econ. Geol.* 2003. V. 98(3). pp. 495–515.
- Ballhaus C., Berry R.F., Green D.H. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // *Contrib. to Mineral. Petrol.* 1991. V. 107(1). pp. 27–40.
- Barnes S.J., Godel B., Güler D., Brenan J.M., Robertson J., Paterson D. Sulfide-olivine Fe-Ni exchange and the origin of anomalously Ni rich magmatic sulfides // *Econ. Geol.* 2013. V. 108(8). pp. 1971–1982.
- Barnes S.J., Kunilov V.Y. Spinel and Mg ilmenites from the Noril'sk 1 and Talnakh intrusions and other mafic rocks of the Siberian flood basalt province // *Econ. Geol.* 2000. V. 95(8). pp. 1701–1717.
- Barnes S.J., Osborne G.A., Cook D., Barnes L., Maier W.D., Godel B. The Santa Rita nickel sulfide deposit in the Fazenda Mirabela intrusion, Bahia, Brazil: Geology, sulfide geochemistry, and genesis // *Econ. Geol.* 2011. V. 106(7). pp. 1083–1110.
- Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks // *J. Petrol.* 2001. V. 42(12). pp. 2279–2302.
- Batanova V.G., Sobolev A.V., Magnin V. Trace element analysis by EPMA in geosciences: Detection limit, precision and accuracy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing, 2018. V. 304 (1). Art. 012001.
- Batanova V.G., Sobolev A.V., Kuzmin D.V. Trace element analysis of olivine: High precision analytical method for JEOL JXA-8230 electron probe microanalyser // *Chem. Geol.* 2015. V. 419. pp. 149–157.
- Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Zhitova L.M., Izokh A.E., Tolstykh N.D., Abersteiner A., Lobastov B.M., Yakich T.Yu. Hybrid Nature of the Platinum Group Element Chromite-Rich Rocks of the Noril'sk 1 Intrusion: Genetic Constraints from Cr Spinel and Spinel-Hosted Multiphase Inclusions // *Econ. Geol.* 2020b. V. 115(6). pp. 1321–1342.
- Chayka I.F., Zhitova L.M., Antsiferova T.N., Abersteiner A., Shevko A.Ya., Izokh A.E., Tolstykh N.D., Gora M.P., Chubarov V.M., Kamenetsky V.S. In-situ crystallization and continuous modification of chromian spinel in the “sulfide-poor platinum-group metal ores” of the Noril'sk-1 intrusion (Northern Siberia) // *Minerals*. 2020a. V. 10. pp. 498.
- Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // *Chem. Geol.* 2014. V. 368. pp. 1–10.
- Coulthard Jr D.A., Zellmer G.F., Tomiya A., Jégo S., Brahm R. Petrogenetic implications of chromite-seeded boninite crystallization experiments: Providing a basis for chromite-melt diffusion chronometry in an oxybarometric context // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2021. V. 297. pp. 179–202.
- Czamanske G.K., Wooden J.L., Zientek M.L., Fedorenko V.A., Zen'ko T.E., Kent J., King B.W., Knight R.J., Siems D.F. Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of the Noril'sk-Talnakh ore-forming system // *Proc. Sudbury–Noril'sk Symp. Ontario*, 1994. pp. 313–343.
- Distler V.V., Kunilov V.E. Geology and ore deposits of the Noril'sk Region // *Seventh International Platinum Symposium (Moscow–Noril'sk): Field Trip Guidebook*, 1994.
- Distler V.V., Sluzhenikin S.F., Cabri L.J., Krivolutsкая N.A., Turivtsev D.M., Golovanova T.A., Mokhov A.V., Knauf V.V., Oleshkevich O.I. Platinum Ores of the Noril'sk Layered Intrusions: Magmatic and Fluid Concentration of Noble Metals // *Geol. Ore Depos.* 1999. V. 41(3). pp. 214–237.
- Droop G.V.R. A general equation for estimating Fe 3+ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria // *Mineral. Mag.* 1987. V. 51(361). pp. 431–435.
- Duzhikov O.A., Distler V.V., Rylkova G., Naldrett A.J. *Geology and Metallogeny of Sulfide Deposits Noril'sk Region USSR*. Cleveland, OH: Society of Economic Geologists, 1992.
- Fedorenko V.A. Model of genetic relationship between flood basalts, ore-bearing intrusions and Cu–Ni–Pt ores in the Noril'sk region, NW Siberian platform, Russia, abstr 26 // *International Platinum Symposium, 12th, Moscow, August 1–4, 1994, Abstracts*. 1994. pp. 26.
- Fudali R.F. Oxygen fugacities of basaltic and andesitic magmas // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1965. V. 29(9). pp. 1063–1075.
- Genkin A.D., Evstigneeva V.L. Associations of platinum-group minerals of the Noril'sk copper-nickel sulfide ores // *Econ. Geol.* 1986. V. 81(5). pp. 1203–1212.
- Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Palesskii S.V., Nikolaeva I.V. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism // *Earth-Science Rev.* 2013. V. 122. pp. 58–76.
- Jakobsson S., Oskarsson N. The system CO in equilibrium with graphite at high pressure and temperature: An experimental study // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1994. V. 58(1). pp. 9–17.
- Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks // *J. Petrol.* 2001. V. 42(4). pp. 655–671.
- Krivolutsкая N.A. Formation of PGM-Cu-Ni deposits in the process of evolution of flood-basalt magmatism in the Noril'sk region // *Geol. Ore Depos.* 2011. V. 53(4). pp. 309–339.
- Krivolutsкая N.A. *Siberian Traps and Pt-Cu-Ni deposits in the Noril'sk area*: Springer, 2016. 364 p.
- Krivolutsкая N.A., Kuzmin D.V., Gongalsky B.I., Roschina I.A., Kononkova N.N., Svirsкая N.M., Romashova T.V. Stages of Trap Magmatism in the Noril'sk Area: New Data on the Structure and Geochemistry of the Volcanic Rocks // *Geochemistry Int.* 2018. V. 56(5). pp. 419–437.

- Krivolutskaya N.A., Rudakova A.V. Structure and geochemical characteristics of trap rocks from the Noril'sk trough, Northwestern Siberian Craton // *Geochemistry Int.* 2009. V. 47(7). pp. 675–698.
- Krivolutskaya N.A., Sobolev A.V., Mikhailov V.N., Plechova A.A., Kostitsyn Yu.A., Roschina I.A., Fekiasova Z. Parental melt of the Nadezhdinsky Formation: Geochemistry, petrology and connection with Cu-Ni deposits (Noril'sk area, Russia) // *Chem. Geol.* 2012. V. 302. pp. 87–105.
- Latypov R.M. Phase equilibria constraints on relations of ore-bearing intrusions with flood basalts in the Noril'sk region, Russia // *Contrib. to Mineral. Petrol.* 2002. V. 143(4). pp. 438–449.
- Latypov R. Noril'sk-and Lower Talnakh-type intrusions are not conduits for overlying flood basalts: insights from residual gabbroic sequence of intrusions // *Appl. Earth Sci.* 2007. V. 116(4). pp. 215–225.
- Latyshev A.V., Rad'ko V.A., Veselovskiy R.V., Fetisova A.M., Pavlov V.E. Correlation of the Permian-Triassic Ore-Bearing Intrusions of the Noril'sk Region with the Volcanic Sequence of the Siberian Traps Based on the Paleomagnetic Data // *Econ. Geol.* 2020. V. 115(6). pp. 1173–1193.
- Li C., Ripley E.M., Naldrett A.J. A new genetic model for the giant Ni-Cu-pge sulfide deposits associated with the siberian flood basalts // *Econ. Geol.* 2009. V. 104(2). pp. 291–301.
- Lightfoot P.C., Keays R.R. Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian trap, Noril'sk region: Implications for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores // *Econ. Geol.* 2005. V. 100(3). pp. 439–462.
- Likhachev A.P. Ore-bearing intrusions of the Noril'sk region // *Proc. Sudbury-Noril'sk Symp, Ontario.*, 1994. pp. 185–202.
- Malitch K.N., Badanina I.Yu., Belousiva E.A., Tuganova E.V. Results of U-Pb dating of zircon and baddeleyite from the Noril'sk-1 ultramafic-mafic intrusion (Russia) // *Russ. Geol. Geophys.* 2012. V. 53. pp. 123–130.
- Maurel C., Maurel P. Etude expérimentale de la distribution du fer ferrique entre spinelle chromifère et bain silicaté basique // *Bull. minéralogie.* 1984. V. 107(1). pp. 25–33.
- Myers J.T., Eugster H.P. The system Fe-Si-O: Oxygen buffer calibrations to 1,500 K // *Contrib. to Mineral. Petrol.* 1983. V. 82(1). pp. 75–90.
- Naldrett A.J., Asif M., Gorbachev N.S., Kunilov V.Y., Stekhin A.I., Fedorenko V.A., Lightfoot P.C. The composition of the Ni-Cu ores of the Oktyabr'sky deposit // *Noril'sk Reg. Ontario Geol. Surv. Spec.* 1994. V. 5. pp. 357–371.
- Naldrett A.J., Lightfoot P.C., Fedorenko V., Doherty W., Gorbachev N.S. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk region, USSR, with implications for the origin of the Ni-Cu ores // *Econ. Geol.* 1992. V. 87. pp. 975–1004.
- Nikolaev G.S., Ariskin A.A., Barmina G.S., Nazarov M.A., Almeev R.R. Test of the Ballhaus-Berry-Green Ol-Opx-Sp oxybarometer and calibration of a new equation for estimating the redox state of melts saturated with olivine and spinel // *Geochemistry Int.* 2016. V. 54(4). pp. 301–320.
- O'Neill H.S.C. Free energies of formation of NiO, CoO, Ni₂SiO₄, and Co₂SiO₄ // *Am. Mineral.* 1987b. V. 72(3–4). pp. 280–291.
- O'Neill H.S.C. Quartz-fayalite-iron and quartz-fayalite-magnetite equilibria and the free energy of formation of fayalite (Fe₂SiO₄) and magnetite (Fe₃O₄) // *Am. Mineral.* 1987a. V. 72(1–2). pp. 67–75.
- Petry C., Chakraborty S., Palme H. Experimental determination of Ni diffusion coefficients in olivine and their dependence on temperature, composition, oxygen fugacity, and crystallographic orientation // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2004. V. 68(20). pp. 4179–4188.
- Ripley E.M., Lightfoot P.C., Li C., Elswick E.R. Sulfur isotopic studies of continental flood basalts in the Noril'sk region: Implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2003. V. 67(15). pp. 2805–2817.
- Ryabov V.V., Shevko A.Y., Gora M.P. Trap magmatism and ore formation in the Siberian Noril'sk region.: Springer, 2014. 625 p.
- Sluzhenikin S.F., Yudovskaya M.A., Barnes S.J., Abramova V.D., Le Valliant M., Petrenko D.B., Grigor'eva A.V., Brovchenko V.D. Low-Sulfide Platinum Group Element Ores of the Noril'sk-Talnakh Camp // *Econ. Geol.* 2020. V. 115(6). pp. 1267–1303.
- Sobolev A.V., Hoffman A.W., Kuzmin D.V., Yaxley G.M., Arnd N.T., Chung S.-L., Danyushevskiy L.V., Elliott T., Frey F.A., Garcia M.O. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // *Science.* 2007. V. 316(5823). pp. 412–417.
- Sobolev A.V., Sobolev S.V., Kuzmin D.V., Malitch K.N., Petrunin A.G. Siberian meimechites: origin and relation to flood basalts and kimberlites // *Russian Geology and Geophysics.* 2009. V. 50. pp. 999–1033.
- Tolstykh N.D., Zhitova L.M., Shapovalova M.O., Chayka I.F. The evolution of the ore-forming system in the low sulfide horizon of the Noril'sk 1 intrusion, Russia // *Mineral. Mag.* 2019. V. 83(5). pp. 673–694.
- Tolstykh N., Krivolutsкая N., Safonova I., Shapovalova M., Zhitova L., Abersteiner A. Unique Cu-rich sulphide ores of the Southern-2 orebody in the Talnakh Intrusion, Noril'sk area (Russia): Geochemistry, mineralogy and conditions of crystallization // *Ore Geol. Rev.* 2020. V. 122. pp. 103525.
- Yao Z., Mungall J.E. Linking the Siberian Flood Basalts and Giant Ni-Cu-PGE Sulfide Deposits at Noril'sk // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2021. V. 126(3). pp. e2020JB020823.

Информация об авторах:

Чайка И.Ф., младший научный сотрудник, аспирант, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; младший научный сотрудник, лаборатория физико-химических проблем магматизма, Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, Россия.

E-mail: ivanlab211@gmail.com

Изох А.Э., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, лаборатория петрологии и рудоносности магматических формаций, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; профессор, заведующий кафедрой, кафедра петрографии и геологии рудных месторождений, геолого-геофизический факультет, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия.

E-mail: izokh@igm.nsc.ru

Калугин В.М., кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, лаборатория петрологии и рудоносности магматических формаций, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: valery_kalugin@mail.ru

Житова Л.М., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория прогнозно-металлогенических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; доцент, кафедра минералогии и геохимии, геолого-геофизический факультет, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия.

E-mail: zhitova@igm.nsc.ru

Шведов Г.И., доцент, кафедра геологии месторождений и методики разведки, Институт горного дела, геологии и геотехнологий, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

E-mail: g.shvedov@mail.ru

Гора М.П., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория прогнозно-металлогенических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: gora@igm.nsc.ru

Шевко А.Я., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория прогнозно-металлогенических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: sp@igm.nsc.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Chaika I.F., Junior Researcher, PhD student, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; Junior Researcher, Laboratory of Physicochemical Problems of Magmatism, Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka, Russia.

E-mail: ivanlab211@gmail.com

Izokh A.E., Dr. Sci.(Geol.-Miner.), Chief Researcher, Laboratory of Petrology and Ore Potential of Magmatic Formations, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; Professor, Head of the Department, Department of Petrography and Geology of Ore Deposits, Faculty of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: izokh@igm.nsc.ru

Kalugin V.M., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Junior Researcher, Laboratory of Petrology and Ore Content of Magmatic Formations, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: valery_kalugin@mail.ru

Zhitova L.M., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Predictive Metallogenic Research, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; Associate Professor, Department of Mineralogy and Geochemistry, Faculty of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: zhitova@igm.nsc.ru

Shvedov G.I., Assistant Professor, Department of Geology of Deposits and Exploration Methods, School of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: g.shvedov@mail.ru

Gora M.P., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Predictive Metallogenic Research, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: gora@igm.nsc.ru

Shevko A.Y., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Predictive Metallogenic Research, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: sp@igm.nsc.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.09.2021; одобрена после рецензирования 22.09.2021; принята к публикации 14.06.2022

The article was submitted 05.09.2021; approved after reviewing 22.09.2021; accepted for publication 14.06.2022