

Породообразующие минералы норильских рудоносных интрузивов как показатели петро- и рудогенеза

Криволицкая Н. А.¹, Гонгальский Б. И.², Свирская Н. М.¹, Кузьмин Д. В.³

¹ *Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, Москва, nakriv@mail.ru, nsvirsk@mail.ru*

² *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, brgon@igem.ru*

³ *Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, kuzmin@igm.nsc.ru*

Аннотация. Для установления критериев присутствия медно-никелевых руд в базит-ультрабазитовых массивах проведено изучение составов породообразующих минералов месторождений Норильского района (Талнахского и Масловского) с помощью электронного микрозонда, лазерной абляции и методом вторично ионной масс-спектрометрии, а также расплавных включений в них. Установлено, что не только вертикальном разрезе интрузивов состав минералов варьирует в зависимости от магнезиальности пород, но и характер распределения элементов-примесей в них подчиняется в каждом горизонте своему закону (в пикритовом, такситовом или оливиновом). Наиболее контрастно отличаются друг от друга оливины из пикритовых габбро-долеритов разных по рудоносности массивов по набору элементов-примесей (Ni, Ca, Ti, V, HREE, Y). Самые значительные различия в составах породообразующих минералов получены для Масловского месторождения, в составе которого на основании минералого-геохимических данных выделены два массива – Северный и Южный. Изучение состава родоначального расплава Южно-Масловского интрузива, базирующееся на анализе расплавных включений в клинопироксене, свидетельствует о его их соответствии типичным внутриплитным магмам. Полученные результаты могут использоваться при поиске новых рудоносных массивов в совокупности с другими признаками.

Ключевые слова: Норильский район, оливин, пироксен, Масловское месторождение, расплавные включения.

Title Rock-forming minerals of Norilsk ore-bearing intrusions as indicators of petro- and ore genesis

Krivoletskaia N. A.¹, Gongalsky B. I.², Svirskaya N. M.¹, Kuzmin D. V.³

¹ *V. I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Moscow, nakriv@mail.ru, nsvirsk@mail.ru*

² *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, brgon@mail.ru*

³ *V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, kuzmin@igm.nsc.ru*

Annotation. To establish the criteria for the presence of copper-nickel ores in basite-ultrabasite massifs, the compositions of rock-forming minerals in the Norilsk deposits (Talnakh and Maslovsky) were studied using electron microprobe, laser ablation and secondary ion mass spectrometry, as well as melt inclusions in them. It was found that the composition of minerals varies not only in the vertical section of intrusions depending on the magnesium of rocks, but also the character of distribution of element-impurities in them obeys a different law in each horizon (in picritic, taxitic or olivinebearing). Olivines from picritic gabbro-dolerites of different ore-bearing massifs differ from each other most contrastingly in the set of element-impurities (Ni, Ca, Ti, V, HREE, Y). The most significant differences in the compositions of the rock-forming minerals were obtained for the Maslovsky deposit, in which two massifs – Northern and Southern – were identified on the basis of mineralogical and geochemical data. The study of the parental melt composition for the South Maslovsky intrusion, based on the analysis of melt inclusions in clinopyroxene, indicates its correspondence to typical intraplate magma. These results, in combination with other features, can be used in prospecting of new ore-bearing massifs.

Keywords: Norilsk district, olivine, pyroxene, Maslovsky deposit, melt inclusions.

Введение

Богатые платино-медно-никелевые руды ассоциируют с редкими массивами ультрабазит-базитового состава, локализованными на северо-западе Сибирской платформы (Дюжиков и др., 1988). Такая избирательная рудоносность единичных интрузивов в Норильском районе среди огромного множества аналогичных интрузивных тел остро ставит вопрос о специфике их составов относительно остальных базитовых массивов нормальной щелочности и условиях их кристаллизации. На протяжении последних трех десятилетий во многих публикациях предполагается ведущая роль летучих компонентов в рудообразовании, что означает существование особого флюидного режима при формировании PGE-Cu-Ni месторождений (Дистлер и др., 1999; Barnes et al., 2019; Yao, Mungall, 2020). Однако при этом ни состав самих магм, ни содержания в них флюидов не приводятся. Ранее нами было показано (Криволицкая и др., 2021), что все массивы норильского комплекса характеризуются очень близким составом пород вне зависимости от содержания в них сульфидов. Таким образом, по химическому составу пород невозможно судить о рудоносности того или иного массива. Поэтому авторы решили попробовать использовать для этих целей составы породообразующих минералов, особенно ранних ликвидусных фаз – оливинов и пироксенов, а также расплавные включения в них.

Краткие сведения о геологии района

На территории Норильского района на поверхности обнажаются осадочные породы кембрия-нижней перми (мощностью до 11 км), перекрывающиеся вулканогенными породами Сибирской трапповой формации (P_3-T_1), мощность которых достигает 3.5 км (Дюжиков и др., 1988). Интрузивные образования локализованы практически во всех горизонтах стратифицированной толщи и подразделены на несколько комплексов, из которых к норильскому рудоносному комплексу отнесены дифференцированные лентообразные тела габбро-долеритов (рис. 1). Средняя мощность последних составляет около 100 м. Они содержат PGE-Cu-Ni вкрапленные и массивные сульфидные руды, в которых запасы никеля варьируют на 3 порядка в разных месторождениях. В вертикальном разрезе все рудоносные массивы характеризуются близким строением, снизу вверх в них установлены следующие разновидности габбро-долеритов: контактовые, такситовые, пикритовые, оливиновые, оливинсодержащие, безоливиновые; в верхней части отмечаются лейкогаббро, габбро-диориты, верхние такситовые и пикритовые габбро-долериты, верхние контактовые габбро-долериты. Сульфидная вкрапленность приурочена к нижним такситовым и пикритовым габбро-долеритам; в нижнем эндо- и экзоконтактах располагаются жилы массивных руд.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны два месторождения в Норильском районе, характеризующиеся разными запасами никеля: Талнахское и Масловское. Массивы без промышленной минерализации: Норильск 2, Нижне-Талнахский (рис. 1) и Зеленогровский (к югу от площади, показанной на рис. 1) были изучены ранее (Криволицкая и др., 2024). По опорным скважинам в них были изучены составы породообразующих минералов, главным образом, оливинов и пироксенов, а также расплавные и флюидные включения в них.

Состав минералов изучался авторами с помощью микрорентгеноспектрального анализа на микрозонде JXA 8200 «Geol» в Институте химии им. Макса Планка (Майнц, Германия) с помощью усовершенствованной методики – при токе зонда 300 nA и ускоряющем напряжении 20 kV (Sobolev et al., 2007), позволяющей повысить точность измерения в оливинах примесных элементов (Al, Ti, Co) до 20 г/т. Редкие и редкоземельные элементы (Co, Cu, Nd, Sm, Ce, Cr, V, Dy, Y, Yb, Er, Sr, Eu) в минералах были определены методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме с лазерным пробоотбором вещества (масс-спектрометр Thermo Finnigan ELEMENT 2 с лазером New Wave UP 193 и видеокамерой для вывода изображения на монитор компьютера) в Институте химии им. Макса Планка. В качестве стандартов использовались NIST SRM 612 и KL2-G. Диаметр лазера для пробоотбора менялся от 50 до 90 мкм в зависимости от размеров объ-

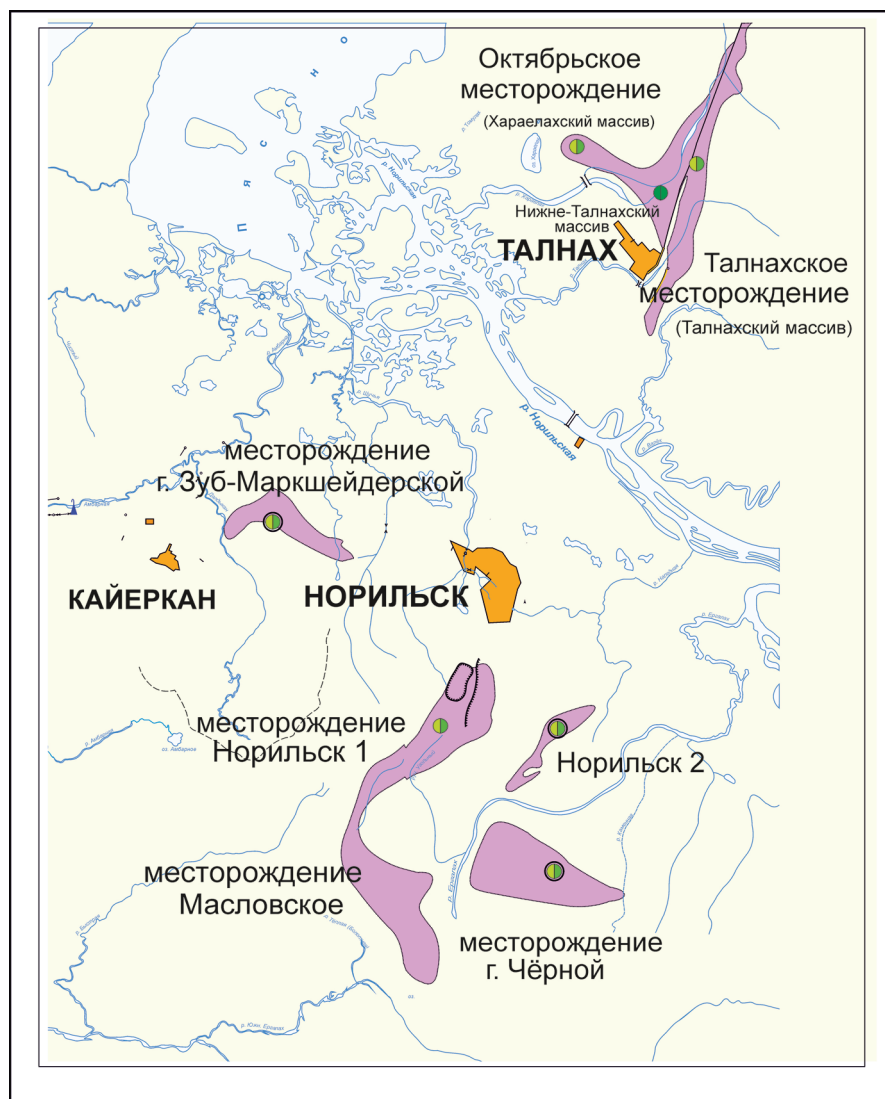


Рис. 1. Схема расположения месторождений в Норильском районе
 Fig. 1. The schema of the deposits' location in the Norilsk region

екта исследований. Для определения содержаний элементов-примесей в пироксенах и в стеклах расплавных включений (Li, Be, B, Ti, Cr, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Dy, Er, Yb, Hf, Pb, Th, U), а также воды и фтора применялся метод вторично-ионной масс-спектрометрии (микроанализатор Cameca-ims4f, ЯФ ФТИАН, г. Ярославль, аналитики С. Г. Симакин и Е. В. Потапов.)

Результаты исследований

Талнахское месторождение (Талнахский интрузив)

Наиболее детально нами было изучено строение и условия кристаллизации Талнахского массива по скважине ОУГ-2. В данном месте интрузив имеет контрастное строение (рис. 2 а): его нижняя часть обогащена оливином, а верхняя сложена безоливиновыми разновидностями – призматическзернистыми габбро-долеритами. Мы исследовали состав оливина и пироксена в этом разрезе по 18 образцам отобраным по вертикали из главных разновидностей пород (рис. 2 б). Состав оливина меняется по разрезу от Fo₆₇ до Fo_{81.5} и зависит от магнезиальности пород, что ранее отмечалось исследователями (Рябов, 1992). Но мы впервые на большом статистическом материале показали поведение элементов-примесей.

Наибольший интерес представляет распределение никеля как главного рудного металла. Оно является очень сложным и определяется не только магнезиальностью расплава и, соответствен-

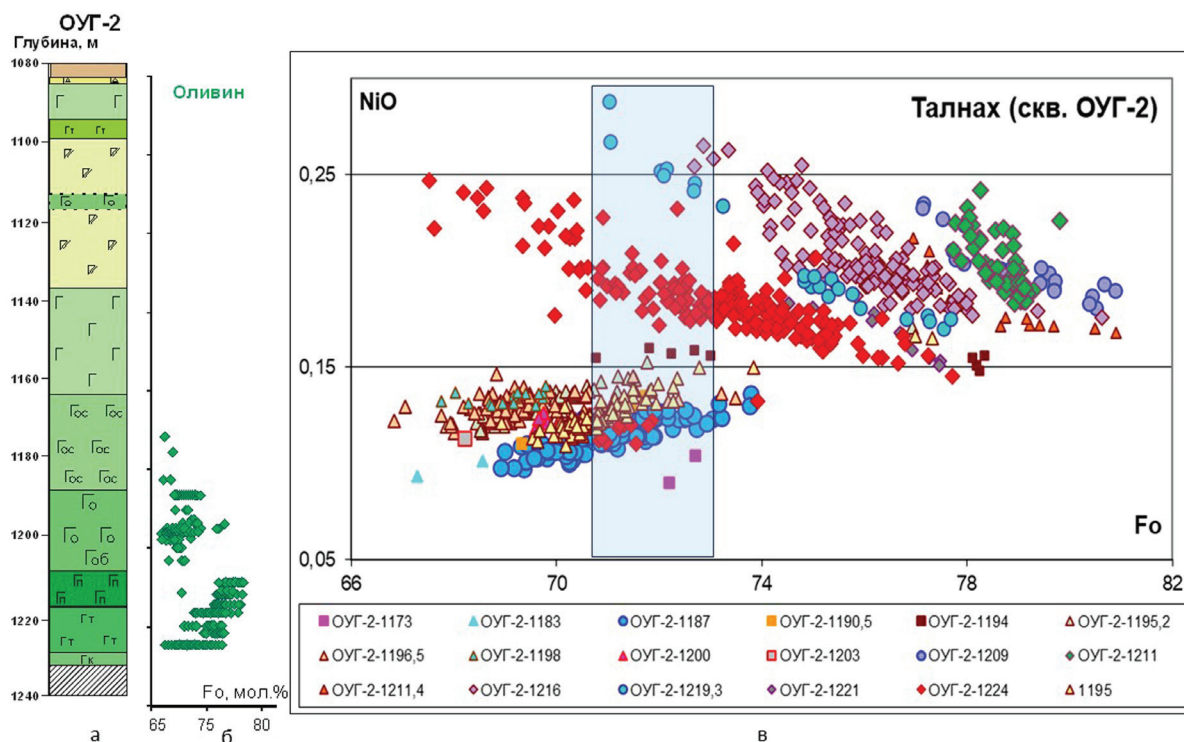


Рис. 2. Строение Талнахского интрузива (а), изменение состава оливина в разрезе (б) и диаграмма Fo (мол. %) – NiO (мас. %) для оливинов Талнахского интрузива. Разновидности пород, габбро-долериты: Гк – контактовые; Гт – такситовые; Гп – пикритовые; Го – оливиновые; Гос – оливинсодержащие; Г – безоливиновые; треугольники с чертой – призматическизернистые габбро-долериты. Данные в табл. 1 и (Криволюцкая и др., 2024)

Fig. 2. Structure of the Talnakh intrusion (a), change in olivine composition in the section (b) and Fo (mol %) – NiO (wt %) diagram for olivines of the Talnakh intrusion. Rock varieties, gabbro-dolerites: Гк – contact, Гт – taxitic, Гп – picritic, Го – olivine, Гос – olivine-bearing, Г – olivine-free; triangles with a line – prismatic-grained gabbro-dolerites. Data in Table 1 and (Krivolutskaya et al., 2024)

но, оливина, но и присутствием сульфидного расплава в родоначальной магме (табл. 1). Как показано на рис. 2в, для каждого образца характерен свой тренд составов, образуемый в координатах Fo – NiO. Оливины из верхней части разреза (оливиновые и оливинсодержащие габбро-долериты) являются наиболее железистыми ($Fo_{67} - Fo_{74}$), для них типична высокая степень корреляции магния и никеля при низких содержаниях NiO (0.1–0.15 мас. %). В породах, где появляются сульфиды (такситовых и пикритовых габбро-долеритах) поведение никеля в оливине резко меняется – его концентрации возрастают с увеличением железистости минерала (до 0.3 мас.%) в Fo_{71-72} . Такие тренды характерны для всех образцов, в которых присутствуют высокомагнезиальные оливины ($> Fo_{74}$) в ассоциации с сульфидами. Следует отметить, что наклон образуемых точками составов трендов возрастает в самых магнезиальных оливинах ($Fo_{78} - Fo_{80}$), то есть в пикритовых габбро-долеритах. Полученные результаты имеют важное прикладное значение, поскольку содержания никеля в оливинах части используют в качестве поискового критерия при изучении новых габброидных массивов. На приведенной диаграмме (рис. 2в) показано полупрозрачное поле, в которое при одной и той же магнезиальности оливина попадают совершенно разные по никелю составы, отличающиеся концентрациями NiO в 3 раза (от 0.1 до 0.3 мас. %)! Таким образом, сопоставление оливинов между собой, отобранных из разных массивов, должно производиться только из соответствующих горизонтов.

Авторами обнаружены в оливинах высокие содержания редких элементов, таких как Dy, Yb, Er (Криволюцкая и др., 2023). Но в данной работе мы демонстрируем поведение Y, концентрации которого выше, чем упомянутых элементов. Его максимальные значения превышают 2 ppm как в пикритовых, так и такситовых, и оливиновых габбро-долеритах. Но в каждой из указанных разновид-

ностей пород распределение иттрия специфично: на диаграмме Fo-Y (рис. 3) точки составов образуют самостоятельные тренды в каждом типе пород. Наиболее крутой из них характерен для самых магнезиальных оливинов из пикритовых габбро-долеритов, более пологий – для такситовых габбро-долеритов и далее для оливиновых и оливинсодержащих разновидностей габбро-долеритов. При этом содержания иттрия снижаются в последнем случае в два раза.

Таблица 1. Выборочные составы оливинов из пород Талнахского массива, мас. % (скв. ОУГ-2)
Table 1. Selected compositions of olivines from the rocks of the Talnakh massif, wt. % (borehole OUG-2)

№ обр.	Fo	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	CoO	Cr ₂ O ₃
1195	71.0	38.31	0.030	0.011	26.56	0.45	36.56	0.172	0.13	0.031	0.006
1195	70.5	37.768	0.026	0.016	26.794	0.46	35.93	0.145	0.12	0.027	0.002
1195.2	70.8	37.959	0.028	0.012	26.567	0.45	36.21	0.175	0.12	0.030	0.003
1196	70.6	37.68	0.034	0.018	26.66	0.44	35.85	0.105	0.14	0.070	0.004
1196	71.5	36.81	0.032	0.013	25.26	0.43	35.58	0.169	0.14	0.070	0.013
1200	70.0	37.92	0.039	0.008	27.27	0.47	35.74	0.144	0.12	0.073	0.007
1200	69.7	37.68	0.044	0.004	27.43	0.47	35.46	0.047	0.13	0.074	0.004
1209	80.5	38.89	0.028	0.014	18.26	0.28	42.31	0.141	0.18	0.059	0.016
1209	80.4	38.87	0.025	0.013	18.35	0.28	42.31	0.141	0.19	0.059	0.016
1211	79.0	38.45	0.029	0.013	19.62	0.32	41.40	0.145	0.19	0.028	0.012
1211	78.1	38.35	0.024	0.022	20.41	0.32	40.86	0.148	0.21	0.028	0.010
1211	80.9	38.92	0.016	0.022	17.99	0.28	42.72	0.142	0.17	0.060	0.028
1211	79.4	38.04	0.018	0.027	19.22	0.29	41.58	0.133	0.17	0.062	0.032
1214	76.3	38.655	0.026	0.010	21.98	0.35	39.66	0.136	0.24	0.029	0.017
1214	77.0	38.925	0.035	0.030	21.49	0.34	40.35	0.146	0.19	0.028	0.015
1219	72.0	37.34	0.031	0.000	25.20	0.40	36.36	0.122	0.25	0.073	0.005
1219	71.0	37.43	0.047	0.013	26.02	0.44	35.76	0.105	0.29	0.070	0.009
1221	77.3	38.81	0.025	0.020	21.24	0.33	40.47	0.145	0.16	0.067	0.020
1221	77.5	38.77	0.030	0.023	20.93	0.33	40.35	0.146	0.15	0.067	0.178
1224	74.4	37.88	0.026	0.013	23.39	0.36	38.17	0.125	0.17	0.072	0.018
1224	75.3	38.13	0.018	0.018	22.52	0.36	38.60	0.138	0.16	0.068	0.012

Примечание. № обр. обозначает глубину по скв. ОУГ-2. Note. No. rev. denotes the depth of borehole OUG-2.

Анализ составов клинопироксенов из тех же горизонтов Талнахского интрузива, что и оливинов, а также из верхних такситовых габбро-долеритов свидетельствует о том, что элементы-примеси в них ведут себя сходным образом с поведением примесей в оливинах. Это, в первую очередь,

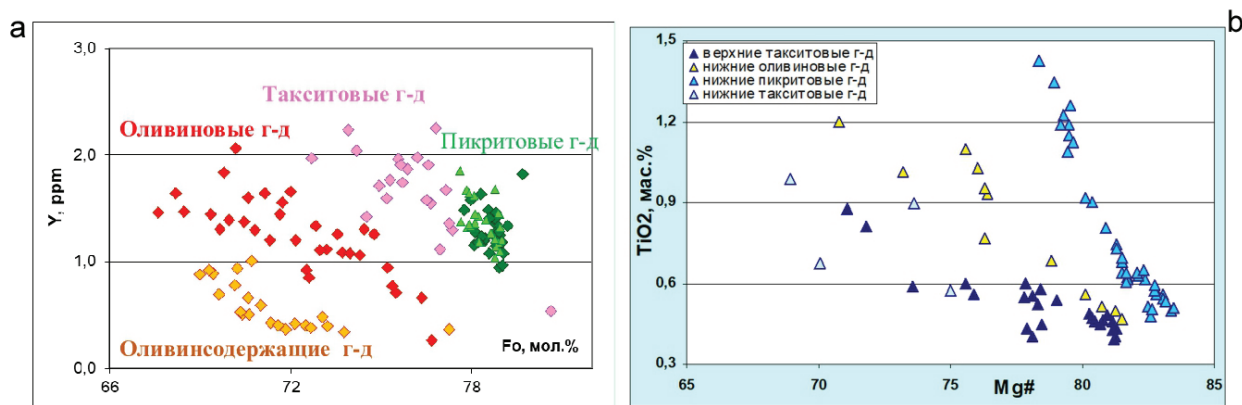


Рис. 3. Диаграмма Fo-Y для оливинов (а) и пироксенов (б) Талнахского массива
Fig. 3. Fo-Y diagram for olivines (a) and pyroxene (b) of the Talnakh massif

касается титана (рис. 3 б), который повторяет распределение иттрия в оливинах. Наиболее крутой тренд образуют точки составов клинопироксенов из пикритовых габбро-долеритов, характеризующиеся одновременно и самыми высокими концентрациями TiO_2 , достигающими почти 1.5 мас. %. Более пологим трендом характеризуются пироксены из оливиновых габбро-долеритов из нижней зоны массива и, наконец, самыми пологие тренды отмечаются для такситовых габбро-долеритов как из нижней части массива, так и из верхней (соответственно отмеченные как «нижние» и «верхние» такситовые габбро-долериты на рис. 3 б).

Масловское месторождение (Северо-Масловский и Южно-Масловский интрузивы)

Масловское месторождение (рис. 1) связывалось геологами с единым Масловским интрузивом, рассматривающимся как южное окончанием интрузива Норильск 1. В ходе наших исследований было выделено в его строении два независимых массива, с которыми ассоциируют преимущественно вкрапленные сульфидные руды, а также редкие тела жильных руд – Северо-Масловский и Южно-Масловский интрузивы. Этот результат базируется на установленной нами разнице между составами породообразующих минералов южной и северной частей месторождения (Криволицкая и др., 2024). Здесь мы приводим данные по распределению тех элементов в оливинах, по которым они отличаются наиболее контрастно в разных массивах. К ним относятся, в первую очередь, цирконий и титан (рис. 4 а, б). Красными значками обозначены составы оливинов, отобранных для изучения из северной части массива, из скважины ОМ-4, а зелеными разных оттенков – из южной части, из скважин ОМ-20 и ОМ-24. На эти же диаграммы нанесены составы оливинов из массива Норильск 1, содержащего одноименное месторождение (сиреневые значки). Все оливины характеризуют пикритовые горизонты указанных интрузивов (табл. 2).

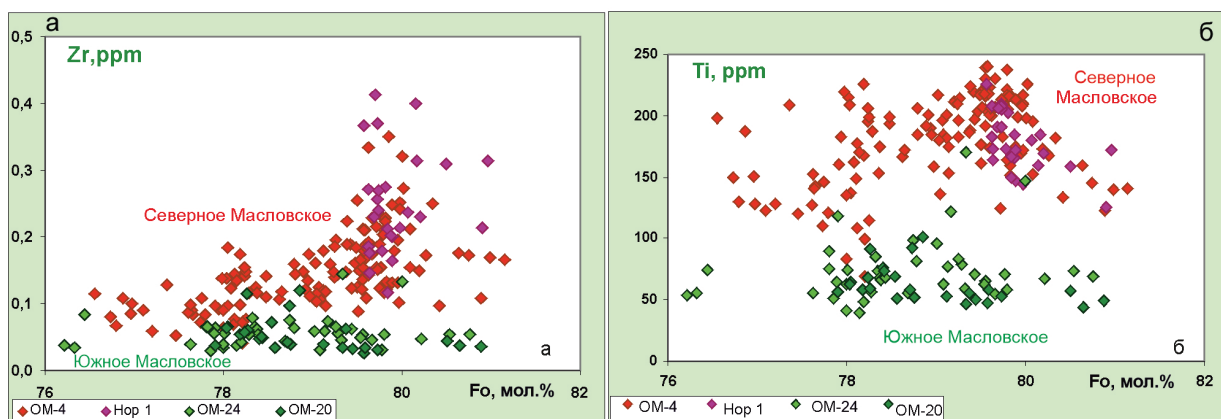


Рис. 4. Диаграммы Fo-Zr (а) Fo-Ti (б) для оливинов Масловского и Норильск 1 месторождений. Данные в табл. 2 и (Криволицкая и др., 2024 б)

Fig. 4. Fo-Zr (a) Fo-Ti (b) diagrams for olivines of the Maslovsky and Norilsk 1 deposits. Data in Table 2 and (Krivolutskaya et al., 2024 b)

Состав родоначальной магмы Южно-Масловского интрузива

Южно-Масловский интрузив является уникальным среди интрузивов норильского комплекса, благодаря своему высокому положению в стратиграфическом разрезе Норильского района: он прорывает породы нижней подсвиты надеждиной свиты туфо-лавовой толщи (T_1), в то время как остальные интрузивы, как правило, залегают значительно ниже – в породах девона или тунгусской серии (C_2 -P). Вероятно, благодаря этому, массив характеризуется очень быстрым остыванием родоначальной магмы, о чем свидетельствует наличие стекла в породах, а также многочисленные стекловатые включения в породообразующих минералах, в основном, в пироксенах (рис. 5), а также в плагиоклазах и единичных зернах оливина в верхней зоне массива. Включения представлены стеклом (G), пузырьком (B) и кристаллами титаномagnetита (Ti-Mag). Нами выполнены эксперименты по нагреванию расплавных включений в клинопироксенах. Включения полностью гомогенизируются.

ются в стекло при $T = 1190^{\circ}\text{C}$, реже они содержат небольшой (< 10 об. %) вакуумный пузырь. Состав их соответствует толеитовому базальту (среднее из 6 включений): $\text{SiO}_2 - 51.02$, $\text{TiO}_2 - 1.6$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 14.33$, $\text{FeO} - 13.21$, $\text{MnO} - 0.22$, $\text{MgO} - 6.32$, $\text{CaO} - 10.51$, $\text{Na}_2\text{O} - 2.88$, $\text{K}_2\text{O} - 0.68$, $\text{P}_2\text{O}_5 - 0.20$, $\text{Cl} - 0.18$, $\text{S} - 0.12$.

С помощью вторично ионной масс-спектропии были измерены содержания летучих компонентов в экспериментально полученных стеклах. Они соответствуют содержаниям флюидов во внутриплитных магмах (мас. %): $\text{H}_2\text{O} - 0.6$, $\text{CO}_2 - 0.15$, $\text{B} - 0.004$.

Таблица 2. Состав оливинов из пикритовых габбро-долеритов Масловского месторождения

Table 2. Composition of olivines from the picritic gabbro-dolerites of the Maslovsky deposit

№	811	811	807	807	807	1006	1006	1006	1006
Fo	78.7	80.2	75.8	78.2	77.9	80.6	80.0	80.1	80.9
SiO_2	38.68	38.82	38.02	38.48	38.70	39.06	39.24	39.27	39.43
FeO	19.79	18.53	22.32	20.27	20.60	18.26	18.85	18.78	18.09
MnO	0.31	0.29	0.34	0.31	0.31	0.28	0.29	0.29	0.28
MgO	41.11	42.16	39.24	40.67	40.61	42.65	42.22	42.37	42.96
CaO	0.23	0.27	0.28	0.31	0.30	0.14	0.10	0.12	0.13
NiO	0.19	0.21	0.19	0.19	0.19	0.22	0.26	0.25	0.23
Cr_2O_3	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02
Total	100.42	100.39	100.47	100.33	100.81	100.70	101.05	101.16	101.22
Y	0.73	0.28	0.35	0.23	0.22	0.71	1.20	1.46	0.42
Dy	0.07	0.02	0.04	0.02	0.01	0.08	0.09	0.12	0.03
Ho	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.02
Er	0.11	0.05	0.05	0.03	0.04	0.11	0.22	0.27	0.07
Tm	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05	0.05	0.01
Yb	0.22	0.09	0.10	0.07	0.07	0.19	0.46	0.50	0.14
Lu	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.09	0.10	0.03
Ti	98.5	67.0	46.9	39.3	51.2	159	210	196	123
Cu	1.39	0.81	0.79	1.21	1.37	0.83	0.80	0.95	0.78
Zn	29	120	173	151	156	112	120	118	114
Sc	11.7	9.0	9.2	9.2	9.2	9.1	9.4	9.6	8.3
Al	176	162	151	169	175	147	87	106	153
Zr	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03	0.18	0.25	0.21	0.11
Co	184	181	182	185	198	182	172	175	181
Ge	0.90	0.82	0.76	0.83	0.80	0.78	0.90	0.74	0.86
V	13.8	10.7	15.5	14.8	14.0	9.40	7.58	8.64	8.53
Li	7.25	4.53	6.20	4.26	4.26	5.63	4.47	5.15	3.74

Примечание. Оксиды даны в мас. %, элементы – в ppm. № обр. 811, 807 – Южно-Масловский массив, 1006 – Северо-Масловский массив

Notes. Oxides are given in wt. %, elements – in ppm. Nos. 811, 807 – South Maslovsky massif, 1006 – North Maslovsky massif

Обсуждение полученных результатов

Проблема выделения рудоносных интрузивов среди огромного сообщества ультрабазит-базитовых тел на Сибирской платформе стоит перед исследователями на протяжении нескольких десятилетий. С этой целью использовались как состав пород, так и строение и состав окружающих рудоносные массивы метаморфических и метасоматических ореолов. Но ни те, ни другие критерии до сих пор не привели к успешному обнаружению новых месторождений даже на северо-западе Сибирской магматической провинции. Попытки использовать для этих целей пороодообразующие минералы также предпринимались неоднократно, особое внимание уделялось содержаниям никеля

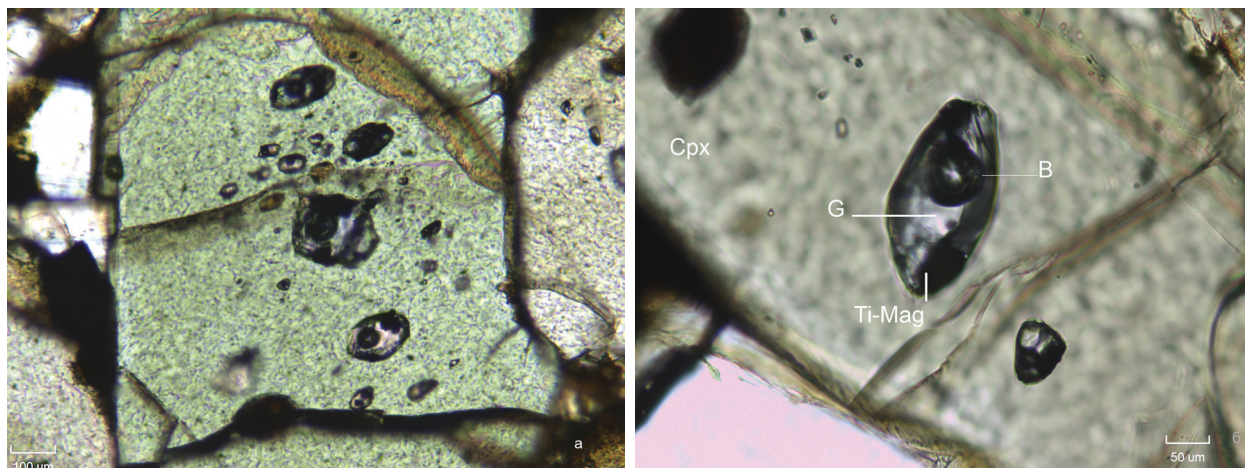


Рис. 5. Расплавные включения в клинопироксенах габбро-долеритов Южно-Масловского массива: а – многочисленные включения в центральной части зерна (шкала слева внизу – 100 мкм); б – крупное расплавное включение, состоящее из стекла (G), титаномагнетита Ti-Mag и пузыря (B); в клинопироксене (Cpx); шкала справа внизу – 50 мкм. Обр. ОМ-24/670

Fig. 5. Melt inclusions in clinopyroxenes of gabbro-dolerites of the Yuzhno-Maslovsky massif: a – numerous inclusions in the central part of the grain (scale on the lower left – 100 μm); b – large melt inclusion consisting of glass (G), titanomagnetite Ti-Mag and bubble (B) in clinopyroxene (Cpx); scale on the lower right – 50 μm. Obr. ОМ-24/670

в оливине (Рябов, 1992), а также составу хромшпинелидов (Barnes, Kuniylov, 2000). Последние не являются широко распространенными минералами, поэтому их использование вряд ли рационально. А интерес к оливинам является вполне обоснованным, так как он является самой ранней ликвидусной фазой, которая фиксирует различия в составах родоначальных расплавов и условия их кристаллизации для массивов разной рудоносности. Развитие современных локальных методов изучения вещества позволило выйти на новый уровень исследования минералов. Впервые нами с помощью лазерной абляции и ионного микрозонда были получены содержания ряда редких элементов, в том числе и редкоземельных, в оливинах и пироксенах норильских месторождений. Полученные данные позволили разделить интрузивы по набору примесей, что было показано с помощью дискриминантного анализа (Криволицкая и др., 2024). В данной статье продемонстрирована разница между оливинами северной и южной частей Масловского месторождения, на основании которой в его строении были выделены Северо-Масловский и Южно-Масловский интрузивы. Эти данные наряду с другими можно использовать при разработке поисковых критериев.

На протяжении многих лет исследователями полагалось, что рудоносные интрузивы характеризуются особым флюидным режимом по сравнению с безрудными массивами, а именно повышенными содержаниями воды и хлора (Дистлер и др., 1999) или присутствием восстановленных газов – H_2S , HN_4 и др. (Служеникин и др., 1994; Аплонов, 1995; Неручев, Прасолов, 1995). Изученные породы Южно-Масловского интрузива оказались чрезвычайно благоприятными для изучения содержаний летучих компонентов в расплавах и показали, что они кристаллизовались из типичных внутриплитных магм с низкими концентрациями воды, углекислого газа, а также не содержат соединений водорода.

Благодарности

Авторы благодарят геологов ООО «Норильскгеология» В. А. Радько, С. Г. Снисара и других за предоставленную возможность изучения керна скважин норильских месторождений. Особую признательность авторы выражают академику А. В. Соболеву за помощь в проведении аналитических работ в лабораториях Института химии им. Макса Планка.

Работа выполнена в рамках Госзадания ГЕОХИ РАН FMMZ-2024-0042 «Процессы, контролирующие образование и эволюцию литосферы Земли», а также при финансовой поддержке РФФИ (№ 18-05-70094) и гранта Вольфганга Пауля (Германия).

Литература

1. Аплонев В. С. Флюидный режим и проблемы платиноносности дифференцированных интрузий основного состава / В. С. Аплонев // Платина России : сборник научных трудов. Т. 2. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов: в 2-х кн. Кн. 1. Москва : АОЗТ Геоинформмарк. 1995. С. 102–106.
2. Дистлер В. В. Платиновые руды норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидного концентрирования благородных металлов / В. В. Дистлер, С. С. Служеникин, Л. Дж. Кабри [и др.]. // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. № 3. С. 241–265.
3. Дюжиков О. А. Геология и рудоносность Норильского района / О. А. Дюжиков, В. В. Дистлер, Б. М. Струнин [и др.]. Москва : Недра, 1988. 249 с.
4. Криволицкая Н. А. Минералого-геохимические особенности Черногорского рудоносного интрузива, Норильский рудный район / Н. А. Криволицкая, Д. В. Кузьмин, Б. И. Гонгальский [и др.]. // Геохимия, 2021. Т. 66. № 7. С. 579–606.
5. Криволицкая Н. А. Породообразующие минералы норильских интрузивов / Н. А. Криволицкая, Б. И. Гонгальский, Д. В. Кузьмин. Москва : Изд-во Товарищество КМК, 2023. Т. 1. 140 с.
6. Криволицкая Н. А. Породообразующие минералы норильских интрузивов / Н. А. Криволицкая, Б. И. Гонгальский, Д. В. Кузьмин. Москва : Изд-во Товарищество КМК, 2024. Т. 2, 3.
7. Неручев С. С. Флюидно-геохимическая модель платиноидных месторождений, связанных с трапповым магматизмом / С. С. Неручев // Платина России: : сборник научных трудов. Т. 2. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов: в 2-х кн. Кн. 1. Москва : АОЗТ Геоинформмарк. 1995. С. 94–101.
8. Рябов В. В. Оливины норильских интрузий как показатели петрогенезиса и рудообразования / В. В. Рябов. Новосибирск : Наука, 1992. 102 с.
9. Служеникин С. Ф. Малосульфидное платиновое оруденение в норильских дифференцированных интрузивах / С. Ф. Служеникин, В. В. Дистлер, О. А. Дюжиков [и др.]. // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36, № 3. С. 195–217.
10. Barnes S. J. Spinels and Mg Ilmenites from the Noril'sk 1 and Talnakh intrusions and Other Mafic Rocks of the Siberian Flood Basalt Province / S. J. Barnes, V. Y. Kunilov // Economic Geology. 2000. Vol. 95 (8). P. 1701–1717.
11. Barnes S.-J. Droplets and Bubbles: Solidification of Sulfide-rich Vapor-saturated Orthocumulates in the Norilsk-Talnakh Ni-Cu-PGE Ore-bearing intrusions / S.-J. Barnes, M. Le Vaillant, B. Godel [et al.]. // Journal Petrology. 2019. Vol 60. P. 269–300.
12. Sobolev A. V. Amount of Recycled Crust in Sources of Mantle-Derived Melts / A. V. Sobolev, A. W. Hofmann, D. V. Kuzmin [et al.]. // Science. 2007. Vol. 316. P. 412–417.
13. Yao Z., Mungall J. Linking the Siberian flood basalts and giant PGE-Cu-Ni sulfide deposits at Norilsk / Z. Yao, J. Mungall // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2021. Vol. 126 (3).