

НОВОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ХРОМИТА–МАГНЕЗИОХРОМИТА И МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ МИНЕРАЛОВ Ni И ЭПГ В МАССИВЕ Г. КУМУЖЬЕЙ, МОНЧЕПЛУТОН, КОЛЬСКИЙ П-ОВ

А. Ю. Барков¹, А. А. Никифоров², Я. А. Пахомовский³, Е. Э. Савченко³

¹ *Череповецкий государственный университет*

² *Воронежский государственный университет*

³ *Геологический институт Кольского научного центра РАН*

Поступила в редакцию 11 декабря 2014 г.

Аннотация: мы описываем новое рудопоявление обогащённых Mg минералов серии хромит-магнезиохромит в гарцбургите (до 45–50 % ортопироксена, 30 % оливина, 20 % хромита, и ≤ 5 объём. % авгита $Wo_{44,1}En_{50,4}Fs_{5,5}$) в массиве горы Кумужьей, расслоенный комплекс Мончеплутон, Кольский п-ов. Минерализованная порода слагается форстерит-($Fe_{90,5}$)-хромитовой матрицей и сфероидами, состоящими из крупных ойкокристаллов ортопироксена (En_{86}), пойкилитовые агрегаты мелкозернистого хромита-магнезиохромита. Оценки составов микровключений методом SEM/EDS согласуются с хизлеводитом ($Ni_{3,2}S_{1,8}$), годлевскимитом ($Ni_{9,2}S_{7,8}$), обогащённым Ni пентландитом ($Ni:Fe \sim 1,5$), лауритом-эрлихманитом [$(Ru_{0,49}Os_{0,23}Ir_{0,23})_{\Sigma 0,95}S_{2,05}$ и $(Ru_{0,70}Os_{0,14}Ir_{0,11})_{\Sigma 0,95}S_{2,05}$], а также скаергаардитом ($Pd_{0,84}Pt_{0,12}Ni_{0,03}$) $_{\Sigma 0,99}Cu_{1,01}$. Наблюдаемое обогащение Ni в сульфидах, вероятно, обусловлено реакцией между хромитом-магнезиохромитом и микрообъёмами сосуществующего сульфидного расплава. Микрозёрна и прожилковидные выделения сульфидов и минералов элементов группы платины (ЭПГ), в основном сосредоточенные в межзерновом пространстве зёрен хромита, образовались после хромита, интерстициальные скопления которого кристаллизовались после высокомагнезиального оливина. В настоящее время не известно является ли обнаруженная ассоциация рудных минералов локальной или частью рудной зоны или стратифицированного горизонта.

Ключевые слова: серия хромит-магнезиохромит, минералы элементов группы платины, сульфиды никеля, рудные минералы, зона гарцбургита, гора Кумужья, расслоенный комплекс Мончеплутон, Кольский полуостров.

A NEW OCCURRENCE OF CHROMITE-MAGNESIOCHROMITE AND MICRO-INCLUSIONS OF MINERALS OF NI AND PGE IN THE MOUNT KUMUZHYA INTRUSION, MONCHEPLUTON, KOLA PENINSULA

Abstract: we describe a new occurrence of chrome spinel, which corresponds to Mg-enriched members of the chromite-magnesiochromite series, in a mineralized harzburgite (up to 45–50 % orthopyroxene, 30 % olivine, 20 % chrome spinel; and ≤ 5 vol. % augite: $Wo_{44,1}En_{50,4}Fs_{5,5}$) in Mount Kumuzhya, Monchepluton layered complex, Kola Peninsula. This rock is principally composed of the forsterite-($Fe_{90,5}$)-chromite matrix and spheroids, which consist of large oikocrysts of orthopyroxene (En_{86}), poikilitically enclosing fine-grained aggregates of chromite-magnesiochromite. SEM/EDS estimates of compositions, reported for analyzed micrograins, are consistent with heazlewoodite ($Ni_{3,2}S_{1,8}$), godlevskite ($Ni_{9,2}S_{7,8}$), Ni-enriched pentlandite ($Ni:Fe \sim 1,5$), laurite-erlichmanite [$(Ru_{0,49}Os_{0,23}Ir_{0,23})_{\Sigma 0,95}S_{2,05}$ and $(Ru_{0,70}Os_{0,14}Ir_{0,11})_{\Sigma 0,95}S_{2,05}$], and skaergaardite ($Pd_{0,84}Pt_{0,12}Ni_{0,03}$) $_{\Sigma 0,99}Cu_{1,01}$. The observed enrichment in Ni is likely resulted from a reaction between chromite-magnesiochromite and coexisting sulphide melt. Micrograins and veinlets of the sulphides and platinum-group minerals, mostly scattered along boundaries of chromite grains, formed after chromite, which mostly occurs as interstitial patches crystallized after the magnesian olivine. It remains presently unknown if the observed association occurs as a local (single) enrichment, or is a part of ore zone, or a stratified horizon.

Key words: chrome spinel, chromite-magnesiochromite series, platinum-group minerals, Ni sulphide, ore minerals, harzburgite unit, Mount Kumuzhya, Monchepluton layered complex, Kola Peninsula.

Введение

В настоящей статье, мы описываем рудопроявление хромита-магнезиохромита (до 20–25 модал. %), встреченное в ходе экспедиционных работ 2014 г. и находящееся на склоне г. Кумужьей (рис. 1), где в минерализованном образце гарцбургита нами установлены микровключения сульфидов и ЭПГ-содержащие фазы. Массивы гор Ниттис, Кумужья, Травяная, Сопча, Нюд и Поаз входят в состав комплекса Мончеплутон, Кольский полуостров. Этот комплекс является одним из наиболее крупных расчлененных комплексов раннепротерозойского возраста (2,5 Ga) и, как известно, обладает значительным и разнообразным рудоносным потенциалом, особенно в отношении Cr, Ni, Cu и ЭПГ [напр., 1–6]. Рудоносная порода, изученная нами, привлекает внимание весьма необычной морфологией своей выветрелой поверхности, на которой рельефно выделяются крупные сфероиды (до 3–4 см) ромбического пироксена, среди матрицы мелкозернистого оливина и хромита; этой тематике будет посвящена отдельная публикация.



Рис. 1. Местоположение (показано звездочкой) хромит-содержащего гарцбургита горы Кумужьей, комплекс Мончеплутон, Кольский по-в, на схематической геологической карте, приведенной по данным [2], с упрощением.

Результаты и обсуждение

Составы и текстурные формы главных породообразующих минералов. Порода, содержащая рудную минерализацию, по своему количественному составу близка гарцбургиту: ок. 45–50 % ортопироксена, 30 % оливина, 20 % хромита-магнезиохромита, и ≤ 5 модал. % клинопироксена. Порода плотная, недеформированная, фактически неизменённая. Как отмечалось, хромитсодержащий гарцбургит слагается матрицей (далее: *M*) и сфероидами (*C*), которые существенно отличаются своими парагенетическими ассоциациями и текстурами главных породообразующих силикатов. Результаты детального изучения показывают, что сфероиды образованы ойкокристаллами высокомагнезиального ортопироксена (анализ 3, табл. 1), которые содержат пойкилитовые агрегаты тонкозернистых «хромовых шпинелей» – минералов серии хромит-магнезиохромит, с довольно высоким содержанием Mg: (анализы 9, 10, табл. 1). Присутствуют также отдельные включения высокомагнезиального оливина (Fe_{89}) и магнезиального авгита (анализы 1, 4, табл. 1).

Характерные особенности наблюдаемых минеральных ассоциаций отражены на рисунках (2а-е, 3). Сравнительно повышенная магнезиальность «хромовых шпинелей» г. Кумужьей (табл. 1) прослеживается в сопоставлении с рядами составов, свойственными как расчлененным интрузиям, так и др. ультрамафит-мафитовым комплексам, включая генетически связанные с ними россыпные рудопоявления [напр., 7, 8]. В качестве акцессорной фазы, в сфероиде установлен апатит (≤ 50 мкм), с обильными микровключениями минерала, обладающего высоким содержанием редкоземельных элементов.

Матрица, главным образом, содержит тонкозернистый оливин: $Fe_{90.5}$ (анализ 2, табл. 1), окружённый скоплениями хромита-магнезиохромита. Такая структура (рис. 2 б) свидетельствует о том, что оливин кристаллизовался ранее хромита. Порода содержит крайне незначительные количества вторичных силикатов: кальциевого амфибола (тремолита) и талька (анализы 5, 6, табл. 1), сформированных в процессе аутометасоматического замещения ромбического пироксена.

Микровключения сульфидов никеля и минералов ЭПГ. По причине крайне малых размеров (≤ 1–3 мкм), микроминералы в рудоносном гарцбургите могли быть охарактеризованы лишь приблизительно (полуколичественно), на основе «оценок» составов, нормализованных к 100 мас. %. Эти результаты получены нами с использованием системы QUANTAX-200, сканирующего электронного микроскопа LEO-1450 (СЭМ) и энерго-дисперсионного спектрометра BRUKER XFlash 5010 (ЭДС), при 20 кВ и 1000 нА.

Округлые микровключения в зёрнах хромита (в сфероиде) состоят из плагиоклаза с высоким содержанием альбитового компонента (Ab_{90}): Na_2O 10,3, Al_2O_3 19,2, SiO_2 70,5 мас. %; или $Na_{0.9}Al_{1.0}Si_{3.0}O_8$. В этих включениях присутствуют и другие вторичные минералы, которые не могли быть диагностированы по причинам своей разнородности и пористости.

Наблюдаемые микрозёрна и прожилковидные выделения сульфидных минералов и минералов ЭПГ, большей частью, тяготеют к межзерновым пространствам зёрен хромита-магнезиохромита, что объясняется их кристаллизацией на довольно поздних стадиях минералообразования, после ассоциирующего хромита. Вместе с тем, включения лаурита-эрлихманита в хромите (рис. 2д) достаточно типичны и, как известно, характерны самым разным типам хромитового оруденения, в том числе в других расчлененных комплексах Балтийского щита [9].

Следует отметить, что, в целом, зёрна «хромовых шпинелей» не обнаруживают сколь-нибудь развитой зональности. Однако, в процессе детального изучения, установлено зональное зерно (ок. 40 мкм; в матрице: рис. 3), состав которого варьирует от ядра к краю в следующих пределах: $(Fe^{2+}_{0.79}Mg_{0.21})_{\Sigma 1.0}(Cr_{1.21}Al_{0.58}Fe^{3+}_{0.21})_{\Sigma 2.0}O_4 \rightarrow (Fe^{2+}_{0.90}Mg_{0.12})_{\Sigma 1.0}(Cr_{1.18}Fe^{3+}_{0.59}Al_{0.18}Ti_{0.02}V_{0.01})_{\Sigma 2.0}O_4$ (СЭМ/ЭДС). Данный тренд согласуется с относительным возрастанием уровня фугитивности O_2 с падением температуры, и соответственным понижением содержания Mg (и ростом Fe) в процессе кристаллизации.

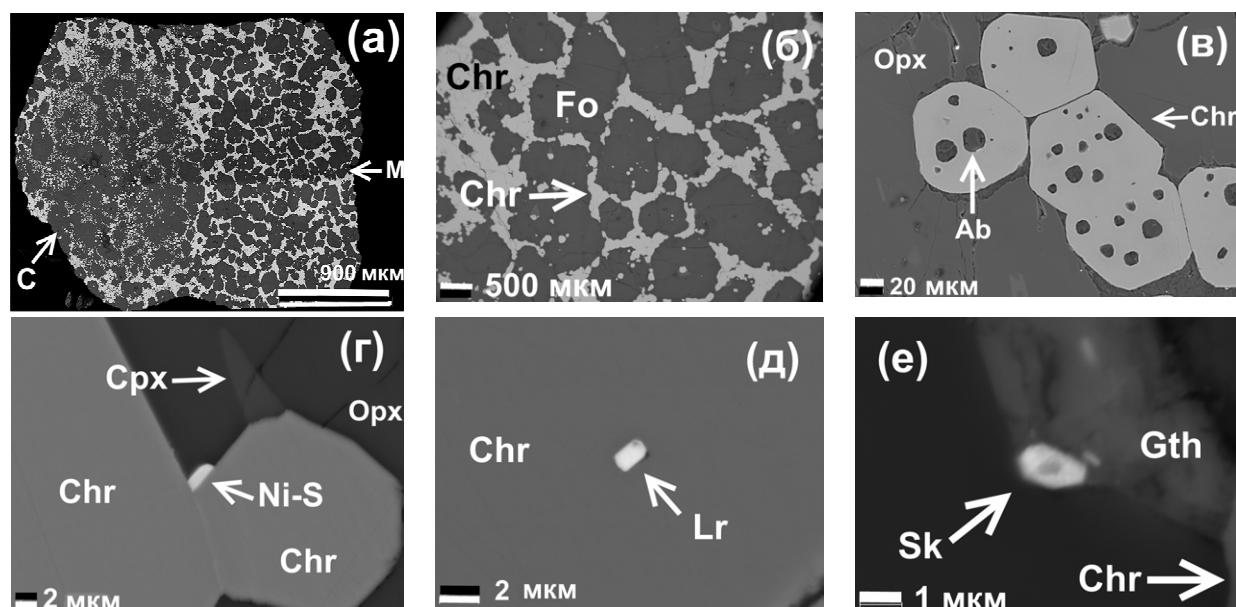


Рис. 2 а – изображение в обратнорассеянных электронах, показывающее текстуру хромитсодержащего гарцбургита, состоящего из сфероидов (С), ойкокристаллов ортопироксена с пойкилитовыми включениями хромита-магнезиохромита, а также матрицы (М), сложенной форстеритом и хромитом-магнезиохромитом (серое); б – увеличение участка матрицы, состоящей из кристаллов высокофорстеритового оливина (Fo) и хромита-магнезиохромита (Chr); в – субидиоморфные кристаллы хромита-магнезиохромита (Chr), локализованные в ортопироксеновом сфероиде (Opх) и содержащие округлые микровключения альбита (Ab); г – микровключение сульфида никеля (Ni-S) у границы зерна хромита-магнезиохромита (Chr); Срх – клинопироксен; д – микровключения лаурита (Lr) в зерне хромита-магнезиохромита (Chr); е – мельчайшее зерно скаергаардита (Sk) у границы выделения гëтитита (Gth), находящегося в ассоциации с хромитом (Chr).

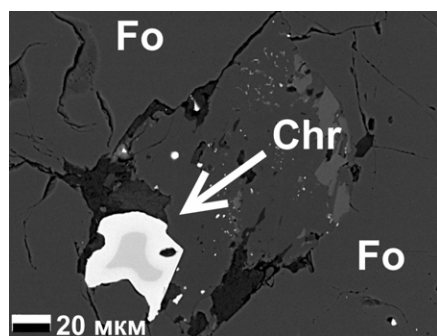


Рис. 3. Небольшое зональное зерно хромита (Chr) в матрице форстерита (Fo).

Три минеральных вида сульфидов Ni предварительно установлены нами по результатам оценок составов (СЭМ/ЭДС; в сфероиде). Хизлевудит (Ni_3S_2) имеет оценочный состав: Ni 76,5, S 23,5, сумма 100 мас. %, соответствуя формуле $\text{Ni}_{3,2}\text{S}_{1,8}$, основанной на сумме 5 атомов на формульную единицу (а.ф.е.). Другая сульфидная фаза отличается более высоким содержанием S и сравнительно пониженным Ni, являясь, вероятно, годлевскитом (Ni_9S_8): Ni 68,3, S 31,7, сумма 100 мас. %, с эмпирической формулой $\text{Ni}_{9,2}\text{S}_{7,8}$ ($\Sigma = 17$ а.ф.е.). Пентландит, ассоциирующий с этими фазами в качестве микровывделений, заметно обогащён Ni; его атомное отношение Ni:Fe составляет ~1,5. Пирротин и халькопирит тоже присутствуют в следовых количествах.

Два минеральных вида ЭПГ – лаурит $[(\text{Ru},\text{Os})\text{S}_2]$ и скаергаардит (PdCu), согласуются с данными наших оценок составов методом СЭМ/ЭДС. Результаты, полученные для двух микрозёрен лаурита-эрлихманита (в матрице): Ru 24,4 и 38,4, Os 21,5 и 14,2, Ir 22,0 и 11,8, S 32,2 и 35,6, сумма 100 мас. %; соответственно,

их формулы $(\text{Ru}_{0,49}\text{Os}_{0,23}\text{Ir}_{0,23})_{\Sigma 0,95}\text{S}_{2,05}$ и $(\text{Ru}_{0,70}\text{Os}_{0,14}\text{Ir}_{0,11})_{\Sigma 0,95}\text{S}_{2,05}$. Высокое содержание Ir в первом зерне достигает, фактически, предела известного в минералах этой серии (≤ 20 мол. % условного дисульфида « IrS_2 »), что связывается с дефектами типа вакансий [10]. Несмотря на то, что, в значительной степени традиционно, лаурит интерпретируется в качестве минерала магматического или субмагматического парагенезиса, достоверно известны его проявления в гидротермальных средах, в хромититах расслоенного Имандровского комплекса, Кольский п-ов [11].

Нормализованная оценка состава интерметаллического соединения, обнаруженного нами в сфероиде (рис. 2е): Pd 49,8, Pt 13,6, Cu 35,8, Ni 0,8, сумма 100 мас. %, близко отвечает стехиометрии скаергаардита: $(\text{Pd}_{0,84}\text{Pt}_{0,12}\text{Ni}_{0,03})_{\Sigma 0,99}\text{Cu}_{1,01}$. Интересно отметить, что существенное содержание Pt здесь указывает на проявление твёрдого раствора с хонгшиитом (PtCu), причём в той же степени, что и в родственной фазе, сообщённой из расслоенной интрузии Пеникат, Финляндия: $(\text{Pd}_{0,92}\text{Pt}_{0,10})_{\Sigma 1,02}\text{Cu}_{0,98}$ [12]. Несмотря на очевидную редкость, скаергаардит, типичным проявлением которого является расслоенный комплекс Скаергаард, Гренландия [13], обнаруживает отчётливую связь с зонами ЭПГ минерализации в расслоенных интрузиях.

Результаты оценки состава акцессорного апатита (СЭМ/ЭДС), в минеральной ассоциации сфероиды: CaO 57,2, $\text{La}_2\text{O}_3 \leq 0,1$, $\text{Ce}_2\text{O}_3 \leq 0,1$, P_2O_5 38,7, F 1,3, Cl 0,7, O \equiv (F,Cl) 0,7, сумма 97,2 мас. %, вполне соответствуют формульным соотношениям фторапатита (в расчёте на 12,5 а.ф.е. (O, OH, F, Cl)): $\text{Ca}_{5,3}(\text{PO}_4)_{2,8}[\text{F}_{0,7}\text{Cl}_{0,2}(\text{OH})_{0,1}]$. Исследованные зёрна фторапатита избобилуют субмикронными включениями минерала(ов) обогащённого РЗЭ, в особенности Ce (12,1–12,6 % Ce_2O_3) и La (7,1–8,9 % La_2O_3), возможно монацита.

Матрица, сфероиды и вероятная последовательность кристаллизации. Наблюдаемые текстуры и составы указывают на следующую последовательность минералообразования: (1) кристаллы высокомагнезильного оливина *Ol* (*M*: матрица) → (2) зёрна хромита-магнезиохромита, интерстициальные по отношению к кристаллам оливина (*M*); субидиоморфные зёрна хромита-магнезиохромита, образующие включения в ортопироксене (*C*: сфероид) → (3) ойкокристаллы ортопироксена (*C*), кристаллизующиеся из более эволюционированного (фракционированного) расплава → (4) интеркумулусный авгит (*C*); зональный хромит (*M*) и фторпатит с микровключениями фаз редких земель (*C*), сформированные из капель захваченных порций расплавов → (5) микрозёрна сульфидов, обогащённые Ni, формирующиеся у границ зёрен хромита (*C*); микровключения альбита, образованные из захваченных микро-объёмов высокофракционированного расплава, либо из микроглобул остаточного расплава, обогащённого Na и Si, которые являются «несовместимыми» с хромитом.

Заключительные комментарии и сопоставление с ассоциацией в Сопчеозёрском месторождении комплекса Мончеплутон

Таким образом, исследованное рудопроявление может представлять некоторый интерес с точки зрения повышенного содержания хромита-магнезиохромита (до 20–25 объём. %) в ассоциации с незначительными количествами сульфидов Ni и минералов ЭПГ. Недостаточная степень обнажённости района, затрудняет ответ на вопрос: является ли описанное рудопроявление единственным и локальным (рис. 1), или, возможно, принадлежит к стратифицированной минерализации Cr-Ni-ЭПГ, относящейся к известному типу «UG2 reef», который, как известно, характеризуется тесной связью с хромитовым оруденением. Хотя вероятность промышленного характера оруденения г. Кумужьей не

столь велика, такая возможность всё же не должна быть проигнорирована.

Высокомагнезильные составы оливина (Fo₈₉₋₉₁), пироксенов и хромита (табл. 1) отчётливо показывают принадлежность рудосодержащего гарцбургита г. Кумужьей к ранней, высокотемпературной стадии магматического процесса. Состав хромита, (Fe_{0,53}Mg_{0,47})_{Σ1,00}(Cr_{1,26}Al_{0,60}Fe³⁺_{0,12})_{Σ1,98}O₄ (табл. 1), приближается к промежуточному члену серии хромит-магнезиохромит. Мы полагаем, что повышенная никеленосность описанной сульфидной минерализации обусловлена реакцией между хромитом-магнезиохромитом и сосуществующим сульфидным расплавом. Хромит обогащался железом, а в микрокаплях остаточного сульфидного расплава происходило увеличение концентраций Ni.

Ранее, в работе [14], охарактеризована типичная ассоциация лаурита, микровключений сульфидов Ni, форстерита (Fo_{93,5}) и высокомагнезильного оксида Cr-Fe в Сопчеозёрском месторождении хрома, связанного с Дунитовым блоком комплекса Мончеплутон. Пересчёт опубликованного анализа данного оксида [«хромита»: 14] обнаруживает, однако, значительное преобладание Mg в составе, свойственное магнезиохромиту: (Mg_{0,60}Fe_{0,40})_{Σ1,00}(Cr_{1,44}Al_{0,47}Fe³⁺_{0,10})_{Σ2,01}O₄. Таким образом, налицо более высокомагнезильный характер ассоциации платиносодержащего дунита Сопчеозёрского месторождения.

Благодарности

Мы благодарим Д. В. Афанасьева, ректора ЧГУ, за поддержку проектов НИР в сфере «Науки о Земле»; С. С. Крамзаева (ЧГУ) за напряжённую работу в ходе экспедиционных работ по исследованию комплекса Мончеплутон, а также проф. А. Д. Савко, главного редактора, редакцию и рецензентов журнала «Вестник Воронежского госуниверситета серии Геология» за рассмотрение рукописи статьи.

Таблица 1

Составы породообразующих минералов из хромитсодержащего гарцбургита массива горы Кумужьей, Кольский полуостров

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	(C) Fo	(M) Fo	(C) Opx	(C) Cpx	(C) Am	(C) Tlc	(M) Chr	(M) Chr	(C) Chr	(C) Chr
Мас. %										
SiO ₂	40,08	40,34	55,93	52,87	58,36	62,13	n.d.	0,25	0,19	0,21
TiO ₂	n.d.	n.d.	0,06	0,22	n.d.	n.d.	0,39	0,36	0,38	1,44
Al ₂ O ₃	n.d.	n.d.	1,62	2,42	0,61	0,19	15,77	15,91	18,24	18,74
Cr ₂ O ₃	n.d.	n.d.	0,69	1,37	0,21	0,06	49,31	49,22	46,45	47,12
V ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,17	0,13	0,17	0,13
FeO(total)	10,15	8,89	7,32	3,40	0,86	0,71	24,37	24,23	24,56	22,77
FeO(calc)	–	–	–	–	–	–	19,83	20,14	20,96	21,89
Fe ₂ O ₃ (calc)	–	–	–	–	–	–	5,05	4,55	4,00	0,98
MnO	0,15	0,14	0,20	0,11	n.d.	n.d.	0,28	0,31	0,30	0,29
MgO	49,53	49,87	32,01	17,36	23,94	31,28	9,74	9,75	9,17	9,43
CaO	n.d.	n.d.	1,54	21,11	12,92	0,09	n.d.	n.d.	0,17	0,06
NiO	0,36	0,35	n.d.	n.d.	0,05	0,14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Na ₂ O	n.d.	n.d.	n.a.	n.a.	n.d.	n.d.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
K ₂ O	n.d.	n.d.	n.a.	n.a.	n.d.	n.d.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Сумма	100,3	99,6	99,4	98,9	97,0	94,6	100,5	100,6	100,0	100,3
А.ф.е.										
O	4	4	6	6	23	11	32	32	32	32
Si	0,98	0,99	1,96	1,95	7,98	3,97	–	0,06	0,05	0,05
Al	–	–	–	0,11	0,10	0,01	4,79	4,82	5,52	5,63
Cr	–	–	0,02	0,04	0,02	–	10,05	10,01	9,43	9,50

Продолжение табл. 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V	–	–	–	–	–	–	0,04	0,03	0,04	0,03
Ti	–	–	0,002	0,006	–	–	0,08	0,07	0,07	0,28
Fe ²⁺	0,21	0,18	0,22	0,11	0,10	0,04	4,27	4,33	4,50	4,67
Fe ³⁺	–	–	–	–	–	–	0,98	0,88	0,77	0,19
Mn	0,003	0,003	0,006	0,003	–	–	0,06	0,07	0,07	0,06
Mg	1,81	1,83	1,67	0,96	4,88	2,98	3,74	3,74	3,51	3,58
Ni	0,007	0,007	–	–	–	0,007	–	–	–	–
Ca	–	–	0,06	0,84	1,89	0,01	–	–	0,05	0,02
Fo	89,2	90,5	–	–	–	–	–	–	–	–
Fa	10,3	9,1	–	–	–	–	–	–	–	–
Wo	–	–	3,0	44,1	–	–	–	–	–	–
En	–	–	86,0	50,4	–	–	–	–	–	–
Fs	–	–	11,0	5,5	–	–	–	–	–	–
Fe/(Fe+Mg)	–	–	–	–	–	–	0,58	0,58	0,60	0,58
Cr/(Cr+Al)	–	–	–	–	–	–	0,68	0,67	0,63	0,63

Примечание. Литеры (M) и (C) означают принадлежность проанализированного зерна к «хромит-оливиновой матрице» (M) либо сфероиду (C), образованному ойкокристаллами ортопироксена. Fo оливин (форстерит); Орх ортопироксен; Срх клинопироксен (авгит); Ам амфибол (тремолит); Тс тальк; Chr хромит. № 1–10: представительные результаты электронно-микронных анализов, выполненных методом волновой спектроскопии с использованием прибора Cameca MS-46, при 20 кВ и 30 нА, и следующими стандартами: форстерит (Mg), гематит (Fe), пироп (Al), волластонит (Ca и Si), лоренценит (Ti), синтетическое соединение MnCo₃ (Mn), хромит (Cr) и химически чистый, металлический Ni (Ni). Fe (total) – всё Fe выражено в форме FeO (мас. %). n.d. – не обнаружено; п.а. – не анализировано. Приведённые значения атомов на формульную единицу (а.ф.е.) рассчитаны для указанного количества атомов кислорода. Значения Fe²⁺ и Fe³⁺ вычислены на основе стехиометрии и принципа сохранения баланса зарядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sharkov, E. V. The early Paleoproterozoic Monchegorsk layered mafite-ultramafite massif in the Kola Peninsula: geology, petrology and ore potential / E. V. Sharkov, A. V. Chistyakov // *Petrology*. – 2012. – V. 7 – P. 603–639.
2. Чащин, В. В. Палеопротерозойская Имандра-Варзугская рифтогенная структура (Кольский полуостров): интрузивный магматизм и минерогения / В. В. Чащин, Ф. П. Митрофанов // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2014. – Т. 5(1) – С. 231–256.
3. Гроховская, Т. Л. Рудная платинометаллическая минерализация в Мончегорском магматическом комплексе (Кольский полуостров, Россия) / Т. Л. Гроховская [и др.] // *Геология рудных месторождений*. – 2003. – Т. 45(4) – С. 329–352.
4. Dedeev, A. V. PGE Mineralization of the Monchegorsk layered mafite-ultramafic intrusion of the Kola Peninsula. / A. V. Dedeev, T. N. Khashkovskaya, A. S. Galkin // *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements; Cabri LJ (ed)*. – Canadian institute of mining, metallurgy and petroleum, 2002. – Spec. – V. 54 – P. 569–577.
5. Чащин, В. В. Сопчезерское месторождение хромитов и его платиноносность, Мончегорский плутон (Кольский полуостров, Россия) / В. В. Чащин [и др.] // *Геология рудных месторождений*. – 1999. – Т. 41(6) – С. 507–515.
6. Amelin, Y. V. U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implications for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting. / Y. V. Amelin, L. M. Heaman, V. S. Semenov // *Precambrian Research*. – 1995. – V. 75 – P. 31–46.
7. Barnes, S. J. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. / S. J. Barnes, P. L. Roeder // *Journal of Petrology*. – 2001. – V. 42. – P. 2279–2302.
8. Barkov, A. Y. Chrome spinel from PGE-bearing placer deposits, British Columbia, Canada: mineralogical associations and provenance / A. Y. Barkov [et al.] // *The Canadian Mineralogist*. – 2013. – V. 51 – P. 501–536.
9. Барков, А. Ю. Минералы серии лаурит-эрлихманит из хромитовых горизонтов расслоенных интрузий Карело-Кольского региона. / А. Ю. Барков [и др.] // *ДАН СССР*, 1991. – Т. 319А. – С. 193–196.
10. Barkov, A. Y. Zoned sulfides and sulfarsenides of the platinum-group elements from the Penikat layered complex, Finland / A. Y. Barkov [et al.] // *The Canadian Mineralogist*. – 2004. – V. 42 – P. 515–537.
11. Barkov, A. Y. An unusual association of hydrothermal platinum-group minerals from the Imandra layered complex, Kola Peninsula, northwestern Russia / A. Y. Barkov, M. E. Fleet // *The Canadian Mineralogist*. – 2004. – V. 42. – P. 455–467.
12. Barkov, A. Y. New data on "bonanza"-type PGE mineralization in the Kirakkajuppura PGE deposit, Penikat layered complex, Finland / A. Y. Barkov [et al.] // *The Canadian Mineralogist*. – 2005. – V. 43 – P. 1663–1686.
13. Rudashevsky, N. S. Skaergaardite, PdCu, a new platinum-group intermetallic mineral from the Skaergaard intrusion, Greenland / N. S. Rudashevsky [et al.] // *Mineralogical Magazine*. – 2004. – V. 68 – P. 615–632.
14. Нерадовский, Ю. Н. Платиновые минералы в хромитовых рудах Сопчезерского месторождения (Кольский полуостров) / Ю. Н. Нерадовский, Е. Э. Савченко // *Записки Российского Минералогического Общества*. – 2008. – Ч. 137(2) – С. 59–62.

Череповецкий государственный университет

Барков А. Ю., д. г.-м. н., заведующий научной лабораторией «Промышленная и рудная минералогия»
E-mail: barkov@chsu.ru; Тел.: +7 911 543 9575

Воронежский государственный университет

Никифоров А. А., магистрант геологического факультета
E-mail: port-express@mail.ru; Тел.: +7 951 733 0484

Геологический институт Кольского научного центра РАН

Пахомовский Я. А., к. г.-м. н., заведующий лабораторией физических методов исследования пород, руд и минералов
E-mail: pakhom@geoksc.apatity.ru; Тел.: (81555)79-363.
Савченко Е. Э., ведущий электроник лаборатории физических методов исследования пород
E-mail: pakhom@geoksc.apatity.ru; Тел.: (81555)79-363.

Cherepovets State University

Barkov A. Y., Dr. Sc., Head of Scientific laboratory of industrial and ore mineralogy, E-mail: barkov@chsu.ru; Tel.: +7911543 9575

Voronezh State University

Nikiforov A.A., magistrate student of the Geological Department
E-mail: port-express@mail.ru; Tel.: +7 951 733 0484

Geological Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences

Pakhomovskiy Ya.A., Candidate of sciences (geology & mineralogy), Head of Analytical laboratory of physical methods of studies of rocks, ores and minerals. E-mail: pakhom@geoksc.apatity.ru
Savchenko Ye. E., leading technician (electronics), Analytical laboratory of physical methods of studies of rocks, ores and minerals
E-mail: pakhom@geoksc.apatity.ru; Tel.: (81555)79-363