

Состав апатита из пикритовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива: первые систематические данные по разрезу

Грошев Н.Ю.¹, Никулин И.И.², Сущенко А.М.¹, Михайлова Ю.А.¹, Калашников А.О.¹,
Пахомовский Я.А.¹, Кадыров Р.И.³

¹ Геологический институт, КНЦ РАН, Апатиты, n.groshev@ksc.ru

² ООО «Норникель Технические Сервисы», Санкт-Петербург, iinikulin@gmail.com

³ Казанский федеральный университет, Казань, rail7777@gmail.com

Аннотация. Состав минералов группы апатита (хлорапатит, фторапатит, гидроксилapatит, далее апатит) детально изучен для двух образцов Хараелахского интрузива. Образцы отобраны из верхней и центральной частей слоя пикритовых габбро-долеритов, содержащих соответственно три и восемь ppm Pt+Pd. Апатит ассоциирует преимущественно с магматическими минералами (плагиоклаз, пироксен, сульфиды и оливин). Апатит представлен как удлинёнными идиоморфными, так и изометричными ксеноморфными зёрнами размером 30–250 мкм. Все изученные отдельные зёрна относятся к магматическому апатиту и на диаграмме Cl-F-OH принадлежат единому непрерывному тренду составов, который начинается от гидроксилapatита с 1.25 мас. % Cl и 1.41 мас. % F и заканчивается хлорапатитом, содержащим 6.09 мас. % Cl без F. Многие зёрна характеризуются зональностью с постепенным нарастанием концентрации хлора от ядра к краю, указывая на направление этого тренда. Удлиненные зёрна хлорапатита со слабо проявленной зональностью развиты, главным образом, в верхней части, в то время как изометричные зональные зёрна апатита широко представлены в центральной части слоя. Постмагматический гидроксилapatит (0.73–0.81 мас. % Cl, 0.54–0.57 мас. % F) образует прерывистые каемки вокруг единичных зёрен магматического апатита. В контексте динамической модели формирования норильских рудоносных интрузивов предполагается, что пикритовые габбро-долериты представляют собой закристаллизованный «платиновый реактор», где *in situ* происходило обогащение сульфидной жидкости элементами платиновой группы (ЭПГ) за счет взаимодействия с силикатным расплавом. Индикатором такого *in-situ* взаимодействия может выступать принадлежность магматического апатита из минерализованных мафит-ультрамафитовых пород к обнаруженному тренду составов. С другой стороны, отсутствие этого тренда составов апатита в минерализованных породах, наоборот, может говорить о привнесении обогащенной ЭПГ сульфидной жидкости из других уровней рудно-магматической системы.

Ключевые слова: пикритовый габбро-долерит, хлорапатит, элементы платиновой группы, сульфидные руды, Норильский рудный район.

Composition of apatite from picritic gabbro-dolerites of the Kharaelakh intrusion: first systematic data along the section

Groshev N.Yu.¹, Nikulin I.I.², Sushchenko A.M.¹, Mikhailova Yu.A.¹, Kalashnikov A.O.¹,
Pakhomovsky Ya.A.¹, Kadyrov R.I.³

¹ Geological Institute, Kola Science Centre RAS, Apatity, n.groshev@ksc.ru

² LLC «Nor Nickel Technical Services», St. Petersburg, iinikulin@gmail.com

³ Kazan Federal University, Kazan, rail7777@gmail.com

Abstract. The composition of apatite group minerals (chlorapatite, fluorapatite, hydroxylapatite, hereinafter apatite) has been studied in detail for two samples of the Kharaelakh intrusion. The samples were taken from the upper and central parts of the picritic gabbro-dolerite layer containing three and eight ppm Pt+Pd, respectively. Apatite is predominantly associated with igneous minerals (plagioclase, pyroxene, sulfides, and olivine). Apatite is represented by both elongated euhedral and isometric xenomorphic grains 30–250 µm in size. All studied separate grains are magmatic apatite and, on the Cl-F-OH diagram, belong to a single continuous composition trend, which starts from hydroxylapatite with 1.25 wt. % Cl and 1.41 wt. % F and ends with chlorapatite containing 6.09 wt. % Cl without F. Many grains are characterized by zoning with a gradual increase in chlorine concentration from the core to the edge, indicating the direction of this trend. Elongated chlorapatite grains with weak zoning are developed mainly in the upper part, while isometric zoned apatite grains are widely distributed in the central part of the layer. Post-magmatic hydroxylapatite (0.73–0.81 wt % Cl, 0.54–0.57 wt % F) forms discontinuous rims around single grains of magmatic apatite. In the context of the dynamic model of the formation of the Norilsk ore-bearing intrusions, it is assumed that

the picritic gabbro-dolerites are a crystallized “platinum reactor”, where the sulfide liquid was enriched *in situ* with platinum group elements (PGE) due to the interaction with the silicate melt. An indicator of such the in-situ interaction can be the fact that magmatic apatite from mineralized mafic-ultramafic rocks belongs to the detected compositional trend. From the other hand, the absence of this apatite composition trend in mineralized rocks, on the contrary, may indicate an introduction of PGE-enriched sulfide liquid from other levels of the ore-magmatic system.

Keywords: picritic gabbro-dolerite, chlorapatite, platinum group elements, sulfide ores, Norilsk ore camp.

Введение

Хараелахский интрузив в Норильском рудном районе вмещает одно из богатейших месторождений элементов платиновой группы (ЭПГ) в мире (Barnes et al., 2020). Интрузив представляет собой уникальный разрез открытой динамической магматической системы (Радько, 2016), в котором развит широкий спектр сульфидных руд (рис. 1 А) с содержаниями ЭПГ (концентрации в 100 % сульфиде) от 18 ppm в массивных сульфидах и 41 ppm в пикритовых габбро-долеритах до 160 ppm в горизонте малосульфидного оруденения (Налдретт, 2003; Sluzhenikin et al., 2020). Важным индикатором платинометалльного рудогенеза, по мнению ряда исследователей (например, Boudreau et al., 1986), является хлорапатит, который отражает насыщение магматического флюида хлором. Хлор, как предполагается, участвует в виде комплексных соединений в переносе и концентрировании ЭПГ. В то же время, во многих мафит-ультрамафитовых интрузивах с развитым в породах хлорапатитом платинометалльное оруденение не образует значимых рудных тел или отсутствует (Järvinen et al., 2020) и наоборот (Halkoaho et al., 1990; Groshev et al., 2019), поэтому петрогенетическое значение апатита в настоящее время нельзя считать вполне ясным. Эти факты нацеливают на более детальное исследование особенностей распределения, минеральных ассоциаций и состава минералов группы апатита в типовом разрезе интрузива, включающем как уровни развития хлорапатита, так и обогащенное ЭПГ сульфидное оруденение. С этой точки зрения разрез Хараелахской интрузии, в особенности уровень пикритовых габбро-долеритов, является наиболее приоритетным для исследования.

Пикритовые габбро-долериты, «капельники» или глобулярные руды (Спиридонов, 2022), встречаются во всех рудоносных интрузивах норильского типа и являются их своеобразной ви-

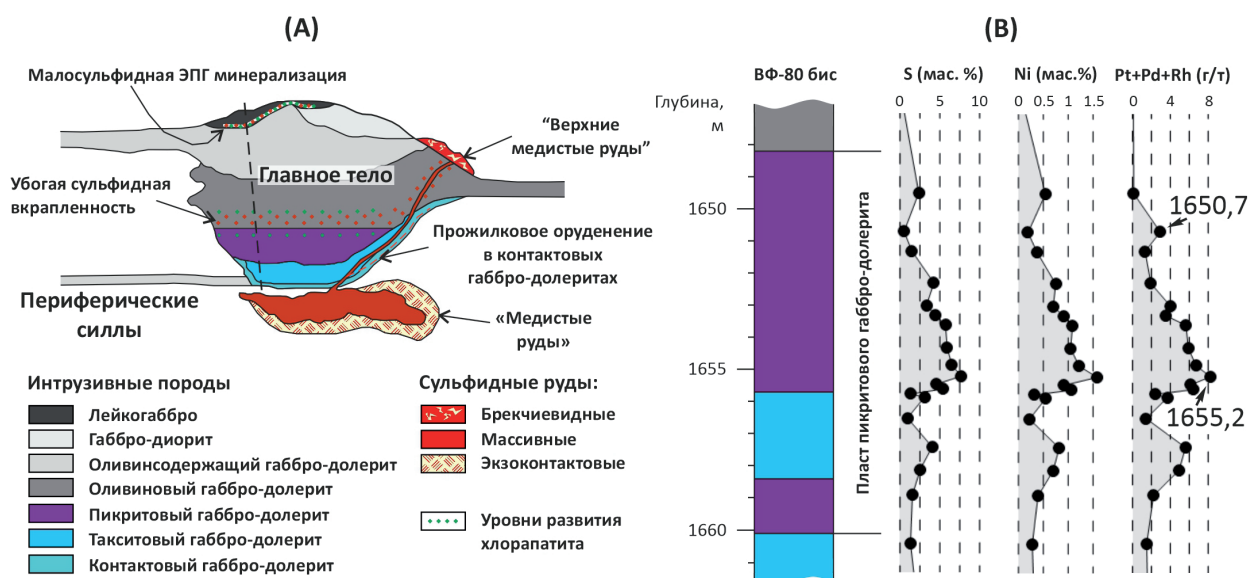


Рис. 1. (А) Схематический обобщенный разрез интрузива норильского типа по (Налдретт, 2003), с изменениями. Штриховая линия показывает положение скважины. (В) Разрез пласта пикритовых габбро-долеритов по скважине ВФ-80бис из Хараелахского интрузива с вариациями концентраций S, Ni и ЭПГ по (Никулин и др., 2022), с изменениями.

Fig. 1. (A) Schematic generalized section of the Norilsk-type intrusion. Modified from (Naldrett, 2003). The dashed line shows the drill hole position. (B) Cross section of the picritic gabbro-dolerite layer after the VF-80 bis drill hole from the Kharaelakh intrusion with variations in S, Ni, and PGE concentrations. Modified from (Nikulin et al., 2022).

зитной карточкой (Barnes et al., 2019). Эти породы предоставляют ряд ключевых свидетельств о процессе сульфидного рудообразования в Норильском районе, о чем в последние годы были написана целая серия публикаций, например, (Le Vaillant et al., 2017; Schoneveld et al., 2020 a). Хлорапатит в верхней части пикритовых габбро-долеритов норильских интрузивов отмечал, например, Рябов с коллегами (Ryabov et al., 2014). Тематические исследования норильского апатита (Серова, Спиридонов, 2018) позволили выявить три генерации этого минерала, включая генерацию с низкофтористым трендом составов гидроксилапатит-хлорапатит. Обширные данные по составу апатита из восточного фланга Октябрьского месторождения в Харалахском интрузиве приведены в работе (Barkov et al., 2021) Au-Ag, REE, Y, Zr, U, Th, and Cl-F-enriched minerals is found in zones with base metal sulfides (BMS; ~ 5 vol. % to 20 vol. %), в которой примерно половина полученных составов соответствует хлорапатиту. Поскольку ни в одной из работ, затрагивающих состав норильского апатита, не ставилась задача детального изучения слоя пикритовых габбро-долеритов, в настоящей статье представлена попытка сравнительного изучения апатита из различных частей этого слоя с акцентом на развитие динамической модели рудообразования в норильских рудоносных интрузивах.

В качестве первого шага мы изучили апатит и петрографические особенности пород из верхней части пласта (рис. 1 В), содержащей, главным образом, интерстициальные сульфиды в количестве 1 об. % (обр. 80/1650.7; 3 ppm Pt+Pd), и из его середины, где породы содержат 10 об. % каплевидных и интерстициальных сульфидов (обр. 80/1655.2; 8 ppm Pt+Pd). Детали методики петрографических исследований приведены ниже, за исключением метода рентгеновской компьютерной томографии зерна (рис. 2 А, В), подробно описанного в монографии (Никулин и др., 2022).

Методика исследования

Петрографические особенности пород изучены в прозрачных шлифах на оптическом микроскопе Аxioplan II с видеокамерой, в комбинированных шлифах и в дополнительных аншлифах. Дополнительные аншлифы были изготовлены для улучшения качества полированной поверхности, которая содержала множество дефектов полировки в комбинированных шлифах.

Определение химического состава минералов выполнено в Геологическом институте Кольского научного центра РАН с помощью локального рентгеноспектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе Leo 1450, оборудованном ЭДС-спектрометром Aztec Ultimmax 100. Изображения в обратно рассеянных электронах (BSE-изображения) были получены для 12 участков каждого комбинированного шлифа, с покрытием ~ 90 % площади препарата. Далее для всех участков были получены карты распределения Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Na, Ni, P, S, Si и Ti, позволяющие, кроме прочего, локализовать выделения апатита. Диагностика минералов по химическому составу выполнялась для всех фаз крупнее 10 мкм, измерения проводились в наиболее однородных зонах зерен путем получения спектров в не менее чем трех точках одного зерна. Затем состав усреднялся, если разница между анализами не превышала 5 %. Дополнительные аншлифы были использованы для создания BSE-изображений минералов при большом увеличении и детальных элементных карт, а также для определения состава апатита, хромита и других мелких минералов.

Результаты

Разрез пласта пикритовых габбро-долеритов, вскрытый скважиной ВФ-80бис на восточном фланге Халелахской интрузии, представлен на рисунке 1В. Эти породы образуют слой мощностью ~12 м, залегающий на такситовых габбро-долеритах и перекрытый оливиновыми габбро-долеритами. Содержание сульфидов и ЭПГ постепенно нарастает от кровли к середине пласта, где породы с обильной каплевидной вкрапленностью сульфидов содержат до 8.4 ppm Pt+Pd+Rh (рис. 1 В). Ниже обогащенного сульфидами уровня пикритовые габбро-долериты становятся такситовидными на протяжении ~2.5 м, благодаря увеличению в них содержания плагиоклаза, а затем переходят в свою обычную разновидность с умеренной сульфидной вкрапленностью.

Пикритовый габбро-долерит — это мелко-среднезернистая темно-серая до черного порода, с белыми пятнами скоплений зерен плагиоклаза, частыми на нижних уровнях разреза. Без учета сульфидной вкрапленности и других неоднородностей порода содержит (рис. 2) от 25 до 30 об. %

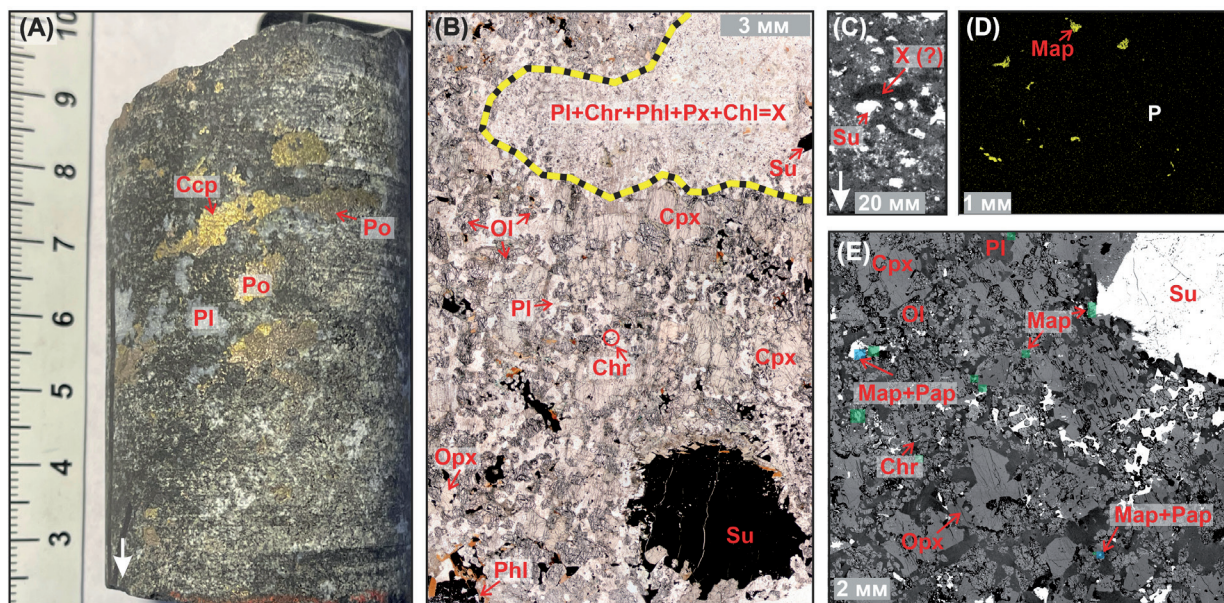


Рис. 2. Главные петрографические особенности пикритовых габбро-долеритов по данным образца 80/1655.2. (А) Фотография образца. (В) Панорамированная микрофотография шлифа в проходящем свете. (С) Рентгеноплотностной срез керна (белая стрелка указывает на увеличение глубины). (D) Карта распределения фосфора, 9 участок, комбинированный шлиф. (Е) Панорамированное BSE-изображение аншлифа. Сокращения: Ccp – халькопирит, Cpx – клинопироксен, Chl – хлорит, Chr – хромит, Ilm – ильменит, Map – магматический апатит, Ol – оливин, Opx – ортопироксен, Pap – постмагматический апатит, Pl – плагиоклаз, Po – пирротин, Su – сульфиды.

Fig. 2. Main petrography features of the picritic gabbro-dolerites (sample 80/1655.2). (A) Sample photograph. (B) Panoramic photomicrograph of a thin section in transmitted light. (C) X-ray density section of the drill core (white arrow indicates increasing depth). (D) Phosphorus distribution map, 9th site, plane-polished thin section. (E) Panoramic BSE image of a polished thick section. Abbreviations: Ccp, chalcopyrite; Cpx, clinopyroxene; Chl, chlorite; Chr, chromite; Ilm, ilmenite; Map, magmatic apatite; Ol, olivine; Opx, orthopyroxene; Pap, post-magmatic apatite; Pl, plagioclase; Po, pyrrhotite; Su, sulfides.

оливина Fo_{75-76} (здесь и далее пределы вариаций состава взяты по образцам 80/1655.2 и 80/1650.7 соответственно), от 30 до 15 об. % плагиоклаза An_{47-76} , от 50 до 20 об. % клинопироксена (ф.к. $Mg=0.90-0.93$, $Fe=0.20$, $Ca=0.77-0.78$, $Cr=0.03-0.02$), от 10 до 5 об. % ортопироксена En_{78-79} , от 1 до 2 об. % флогопита (ф. к. $Mg=2.255-1.948$, $Cl=0.035-0.019$). Среди оксидных минералов, кроме магнетита, ильменита, рутила, бадделеита и циркелита, широким распространением пользуется хромит (ф. к. $Cr=0.73-0.89$, $Fe^{2+}=1.11-0.50$), образующий изометричные зерна размером 20–100 мкм, включенные в различные пороодообразующие минералы. На глубине 1655.2 м хромит встречается в основной массе породы редко и тяготеет, главным образом, к скоплениям плагиоклаза округлой формы (рис. 2 А, В), в то время как в образце 80/1650.7 – включен как в пироксен, так и в оливин с плагиоклазом. Вторичные минералы в породе развиты незначительно и представлены амфиболом, серпентином, хлоритом, тальком и шамозитом.

Сульфиды в породах преимущественно представлены халькопиритом, пирротинном и пентландитом, которые образуют мелкие интерстициальные зерна и более крупные каплевидные сростки. Последние развиты преимущественно в образце 80/1655.2 и имеют размер в среднем 0.5 см. На рисунке 2 представлен один из крупнейших таких сростков размером 8 мм. К сожалению, в шлифах не удалось наблюдать «сегрегационных пузырьков», сложенных водосодержащими минералами и крайне характерными для «капельников» (Barnes et al., 2019). Размер интерстициальных сульфидов варьирует от 200 до 500 мкм. Сфалерит и галенит встречаются редко. Сфалерит встречен в образце 80/1650.7 в виде нескольких зерен размером до 50 мкм, включенных в халькопирит. Галенит обнаружен в образце 80/1655.2 в виде микронных включений в пирротине и отдельного зерна размером 20 мкм на границе плагиоклаза и ортопироксена. В этом же образце встречены зерна

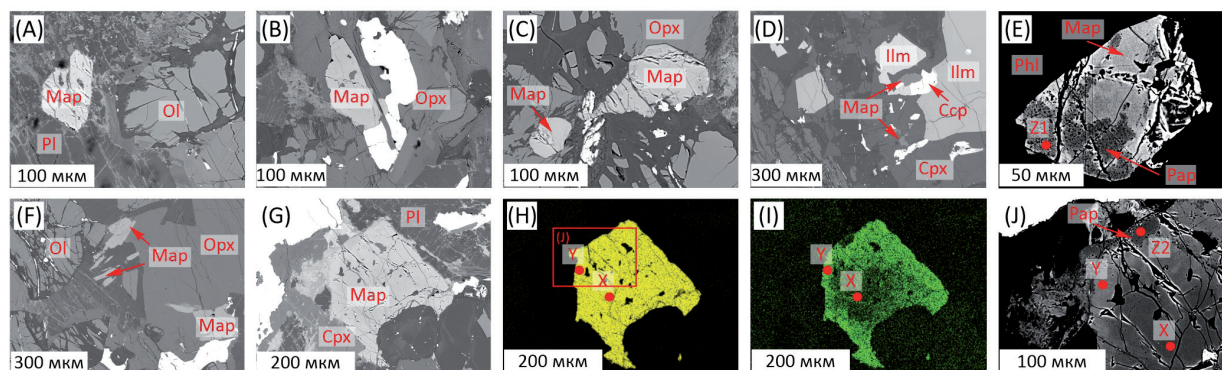


Рис. 3. BSE-изображения апатита из образца 80/1655.2 с детальными картами распределения фосфора (H) и хлора (I). X и Y – точки анализа 1 и 2 в таблице 1 соответственно, Z1 и Z2 – точки анализа вторичных каемок в апатите (Z2 = анализ 3). Сокращения минералов см. рис. 2.

Fig. 3. BSE images of apatite from sample 80/1655.2 with detailed distribution maps of phosphorus (H) and chlorine (I). X and Y are analysis points 1 and 2 in Table 1, respectively; Z1-2 are analysis points of secondary rims in apatite (Z2 = analysis 3). Abbreviations: see fig. 2.

майченерита PdBiTe и станнопалладинита $(\text{Pd,Cu})_3\text{Sn}_2$ размером несколько микрон в ассоциации с пентландитом и халькопиритом.

Апатит образует как удлинённые идиоморфные, так и изометричные ксеноморфные зерна размером 30–250 мкм, ассоциирующие преимущественно с магматическими минералами (плагиоклаз, пироксен, сульфиды и оливин). По морфологии и минеральной ассоциации все отдельные зерна относятся к магматическому апатиту (рис. 3, 4).

Вариации состава апатита характеризуются 21 ЭДС-анализом. Представительные анализы приведены в таблице 1. Фигуративные точки апатита из обеих частей слоя на диаграмме Cl-F-OH (рис. 5) принадлежат единому тренду составов, который начинается от гидроксиапатита с 1.25 мас. % Cl и 1.41 мас. % F и заканчивается хлорапатитом без F, содержащим 6.09 мас. % Cl. Данные детального элементного картирования (рис. 3 H, I) и высококонтрастные BSE-изображения (рис. 3 E, J) указывают на постепенное увеличение концентрации хлора от центра к краевой части некоторых зерен апатита. Это свидетельствует о нарастании концентрации хлора по мере кристаллизации и о направлении установленного тренда.

Отмеченный выше тренд попадает в поля составов апатита из платиноносных расслоенных комплексов Бушвельд и Стиллуотер (рис. 5 B). Для норильских интрузивов этот тренд установлен, по-видимому, впервые, что стало возможным благодаря детальным и целенаправленным исследованиям одного и того же типа пород. Необходимо отметить, что тренд пересекает поля составов раз-

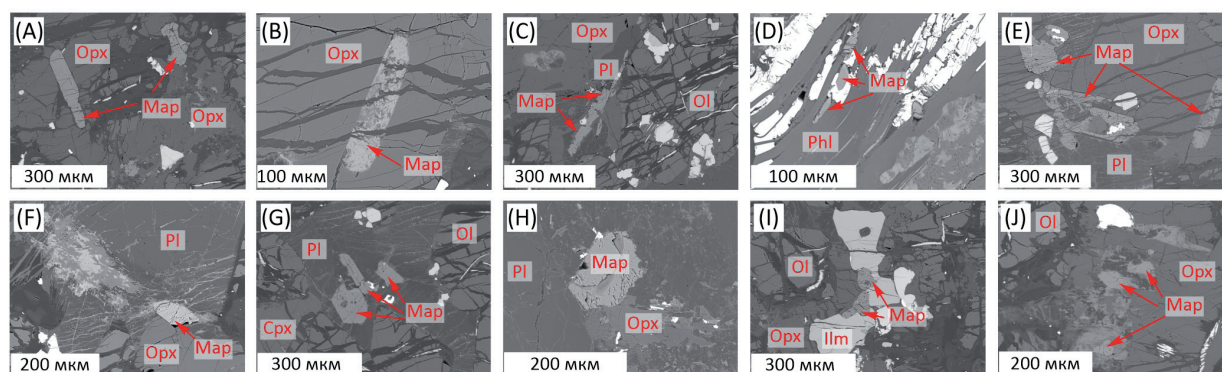


Рис. 4. BSE-изображения апатита из образца 80/1650.7. Сокращения минералов (см. рис. 2).

Fig. 4. BSE images of apatite from sample 80/1650.7. Abbreviations: (see fig. 2).

личных генераций апатита (рис. 5 А), выделенных в работе (Серова, Спиридонов, 2018), указывая на более сложную историю этого минерала в норильских интрузивах, чем предполагалось ранее.

Обедненный хлором гидроксиапатит (0.73–0.81 мас. % Cl, 0.54–0.57 мас. % F), выбивающийся из магматического тренда и развитый в виде тонких прерывистых вторичных каемок вокруг отдельных зерен (рис. 3 Е, I, J), близок по своим свойствам апатиту третьей генерации из работы (Серова, Спиридонов, 2018; рис. 5 А) и рассматривается как постмагматический.

Таблица 1. Представительные анализы апатита из пикритовых габбро-долеритов Хараелакского интрузива

Table 1. Representative analyzes of apatite from the picritic gabbro-dolerites of the Kharaelakh intrusion

№№ образцов	80-1655.2					80-1650.7				
№№ образцов	1	2	3*	6	8	1	3	4	6	10
CaO (мас. %)	53.83	53.21	54.31	52.34	52.68	52.88	51.99	52.60	53.30	52.54
Na ₂ O	–	0.09	–	–	0.06	0.16	0.16	0.10	0.03	0.07
MgO	0.40	–	0.07	–	0.14	–	–	–	–	–
SrO	0.28	–	0.42	0.23	0.26	0.34	0.37	0.34	0.28	0.36
Fe ₂ O ₃	0.38	0.66	0.55	0.32	0.64	0.37	0.35	0.47	0.33	0.63
La ₂ O ₃	–	0.23	0.15	–	–	0.23	0.29	–	0.09	0.28
Ce ₂ O ₃	–	0.49	0.32	0.20	0.52	0.54	0.66	0.41	0.23	0.49
Nd ₂ O ₃	–	0.19	0.13	–	0.21	0.27	0.19	0.18	0.24	0.24
P ₂ O ₅	41.39	40.98	41.77	40.35	40.85	40.44	40.34	40.73	41.19	40.94
SiO ₂	0.39	–	0.30	0.30	0.40	0.47	0.53	0.40	0.47	0.49
F	1.41	–	0.54	0.59	1.05	0.44	0.63	0.76	1.43	–
Cl	1.25	6.09	0.87	4.76	2.98	5.49	4.30	3.77	2.64	6.07
O = F,Cl	0.88	1.38	0.42	1.32	1.12	1.43	1.24	1.17	1.20	1.37
Сумма	98.45	100.56	99.01	97.77	98.67	100.20	98.57	98.59	99.03	100.74
Формульные коэффициенты										
Ca	4.81	4.75	4.85	4.75	4.73	4.73	4.70	4.74	4.74	4.68
Na	–	0.01	–	–	0.01	0.03	0.03	0.02	0.00	0.01
Mg	0.03	–	0.01	–	0.01	–	–	–	–	–
Sr	0.01	–	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
Fe	0.03	0.05	0.04	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04
La	–	0.01	0.00	–	–	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Ce	–	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Nd	–	0.01	0.00	–	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
P	2.92	2.89	2.95	2.89	2.90	2.86	2.88	2.90	2.90	2.88
Si	0.03	–	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
F	0.37	–	0.14	0.16	0.28	0.12	0.17	0.20	0.38	–
Cl	0.18	0.86	0.12	0.68	0.42	0.78	0.62	0.54	0.37	0.85
OH	0.45	0.14	0.73	0.16	0.30	0.11	0.22	0.26	0.25	0.15

Примечание. Прочерк – ниже предела обнаружения; расчет формул выполнен исходя из 25 отрицательных зарядов; * – постмагматический апатит.

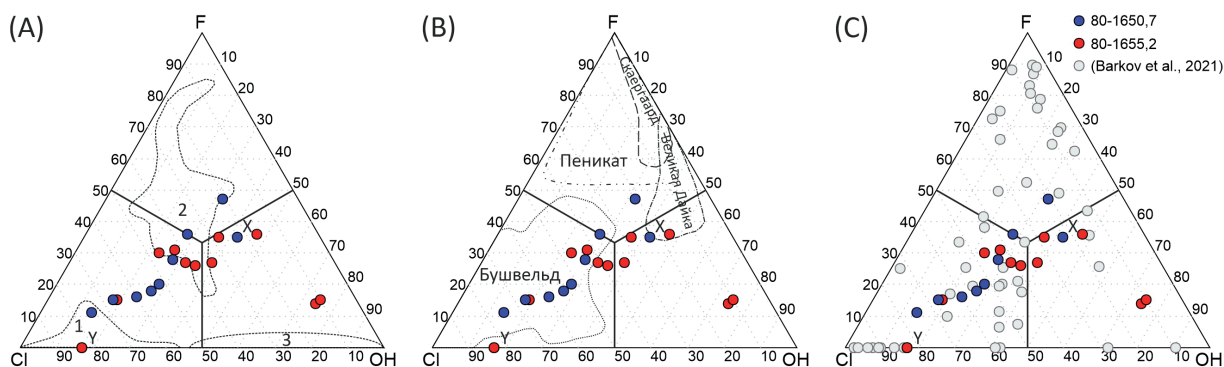


Рис. 5. Тройная диаграмма Cl-F-OH для изученного апатита из пикритовых габбро-долеритов в сравнении с (А) полями составов трех генераций норильского апатита по (Серова, Спиридонов, 2018), (В) объединенным полем апатита из Бушвельдского и Стиллуотерского комплексов, а также полями апатита Скаергаарда, Пениката и Великой Дайки (Boudreau et al., 1986), (С) данными о составе апатита на восточном фланге Октябрьского месторождения из работы (Barkov et al., 2021).

Fig. 5. Triangular Cl-F-OH plot for studied apatite from the picritic gabbro-dolerites compared to (A) composition fields of three generations of apatite according to (Serova, Spiridonov, 2018), (B) combined field of apatite from the Bushveld and Stillwater complexes as well as Skaergaard, Penikat and Great Dike apatite fields (Boudreau et al., 1986), (C) data on the composition of apatite from the eastern flank of the Oktyabrskoye deposit after (Barkov et al., 2021).

Заклучение

Пикритовые габбро-долериты Хараелахского интрузива по своему положению в разрезе, минералогическим и структурно-текстурным характеристикам являются ключевым элементом закристаллизованной динамической рудно-магматической системы. Изученные образцы представляют собой оливиновые (сульфид-оливиновые?) кумулаты, сложенные лишь на 30 % и менее кумулятивным силикатным минералом, в то время как интеркумулусное пространство заполнено преимущественно пироксенами, плагиоклазом и сульфидами. Присутствие последних в породе в виде капель без включений зерен оливина указывает на наличие в магме сульфидной жидкости, возможно, до начала кристаллизации оливина. Флюидная компонента, известная для этих пород в виде ореолов водосодержащих минералов над сульфидными каплями, в изученных образцах представлена незначительно. Часть зерен клинопироксена, по опубликованным данным о зональности этого минерала (Schoneveld et al., 2020 b), может относиться к кумулусной стадии кристаллизации, хотя в настоящем исследовании зональность клинопироксена не изучалась.

Очевидно, что на этом уровне разреза динамической магматической системы, в той или иной степени, *in situ* происходил важнейший рудообразующий процесс – экстракция элементов платиновой группы из силикатного расплава в сульфидную жидкость. Исследование состава апатита из слоя пикритовых габбро-долеритов, которые можно образно назвать закристаллизованным «платиновым реактором», дает уникальную возможность оценить роль апатита как возможного индикатора платинометалльного рудогенеза.

Апатит в пикритовых габбро-долеритах представлен двумя генерациями: магматической и постмагматической. В породах преобладает магматический апатит, варьирующий по форме от удлиненных идиоморфных (рис. 4 А) до изометричных ксеноморфных зерен (рис. 3 Н). Зерна апатита образуют включения размером от 30 до 250 мкм в плагиоклазе, ортопироксене, сульфидах и флогопите, а также встречаются на границах этих минералов с оливином, хромитом, клинопироксеном, ильменитом и вторичными минералами. Состав апатита по мере кристаллизации эволюционирует от фтор-гидроксиапатита (1.25 мас. % Cl, 1.41 мас. % F) до хлорапатита без фтора (6.09 мас. % Cl), образуя на диаграмме довольно узкий непрерывный тренд. Во многих ксеноморфных зернах отмечается зональность с обогащением хлором от ядра к краю, которую можно видеть на элементных картах (рис. 3 Н, I) и высококонтрастных BSE-изображениях (рис. 3 Е, J).

Постмагматический апатит в изученных образцах редок и представлен фтор-хлористым гидроксилapatитом (0.73–0.81 мас. % Cl, 0.54–0.57 мас. % F). Состав постмагматического апатита, развитого в виде тонких прерывистых вторичных каемок вокруг магматического апатита, выбивается из вышеназванного тренда и близок по своим свойствам апатиту третьей генерации из работы (Серова, Спиридонов, 2018).

Увязывая ключевую роль пикритовых габбро-долеритов в платинометалльном рудогенезе, о которой говорилось выше, и состав магматического апатита, можно предположить, что принадлежность апатита из минерализованных ЭПГ пород к подобному тренду может указывать на процесс обогащения сульфидной жидкости платиноидами *in situ* на данном уровне разреза магматической камеры. С этой точки зрения, отсутствие обогащенных хлором зерен магматического апатита, например, в минерализованных такситовых габбро-долеритах (С.А.М., неопубликованные данные), может быть интерпретировано как индикатор привнесенного характера сульфидной жидкости, обогащенной ЭПГ на других уровнях разреза. Полученные первые результаты по составу апатита из пикритовых габбро-долеритов представляют большой интерес и требуют продолжения детальных исследований апатита не только в норильских силлоподобных телах, но также и в крупных расслоенных интрузивах, например таких, как Федорово-Панский комплекс на Кольском полуострове.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-27-20106,
<https://rscf.ru/project/22-27-20106/>.

Литература

1. Налдретт А.Д. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: СПбГУ, 2003. 487 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=1947444>.
2. Никулин И.И., Михайлова Ю.А., Калашников А.О., Грошев Н.Ю., Степенщиков Д.Г., Пахомовский Я.А., Кадыров Р.И. Структурно-текстурные и вещественные свойства сульфидных медно-никелевых руд. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2022. 82 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49521947>.
3. Радько В.А. Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 226 с.
4. Серова А.А., Спиридонов Э.М. Три типа апатита в норильских сульфидных рудах // Геохимия. 2018. С. 474–484. <https://doi.org/10.7868/S0016752518050059>.
5. Спиридонов Э.М. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М.Н. Годлевского // Отечественная геология. 2022. № 6. С. 95–116. <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2022-10038>.
6. Barkov A.Y., Nikulin I.I., Nikiforov A.A., Lobastov B.M., Silyanov S.A., Martin R.F. Atypical Mineralization Involving Pd-Pt, Au-Ag, REE, Y, Zr, Th, U, and Cl-F in the Oktyabrsky Deposit, Norilsk Complex, Russia // Minerals. 2021. V. 11. P. 1193. <https://doi.org/10.3390/min11111193>.
7. Barnes S.J., Le Vaillant M., Godel B., Leshner C.M. Droplets and Bubbles: Solidification of Sulphide-rich Vapour-saturated Orthocumulates in the Norilsk-Talnakh Ni–Cu–PGE Ore-bearing Intrusions // Journal of Petrology. 2019. V. 60. P. 269–300. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy114/>
8. Barnes S.J., Malitch K.N., Yudovskaya M.A. Introduction to a special issue on the norilsk-talnakh ni-cu-platinum group element deposits // Economic Geology. 2020. V. 115. P. 1157–1172. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4750>.
9. Boudreau A.E., Mathez E.A., McCallum I.S. Halogen geochemistry of the Stillwater and Bushveld Complexes: evidence for transport of the platinum-group elements by Cl-rich fluids // Journal of Petrology. 1986. V. 27. P. 967–986. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.4.967>
10. Groshev N.Y., Rundkvist T.V., Karykowski B.T., Maier W.D., Korchagin A.U., Ivanov A.N., Junge M. Low-Sulfide Platinum-Palladium Deposits of the Paleoproterozoic Fedorova-Pana Layered Complex, Kola Region, Russia // Minerals. 2019. V. 9. P. 764. <https://doi.org/10.3390/min9120764>.
11. Halkoaho T.A.A., Alapieti T.T., Lahtinen J.J., Lerssi J.M. The Ala-Penikka PGE reefs in the Penikat layered intrusion, northern Finland // Mineralogy and Petrology. 1990. V. 42. P. 23–38. <https://doi.org/10.1007/BF01162682>
12. Järvinen V., Halkoaho T., Konnunaho J., Heinonen J. S., Rämö O.T. Parental magma, magmatic stratigraphy, and reef-type PGE enrichment of the 2.44-Ga mafic-ultramafic Näränkäväära layered intrusion, Northern Finland // Mineralium Deposita. 2020. V. 55. P. 1535–1560. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00934-z>.

13. Ryabov V.V., Shevko A.Y., Gora M.P. Trap magmatism and ore formation in the Siberian Noril'sk region. Springer. 2014. 408 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5022-7>.
14. Schoneveld L., Barnes S.J., Godel B., Le Vaillant M., Yudovskaya M.A., Kamenetsky V., Sluzhenikin S.F. Oxide-Sulfide-Melt-Bubble Interactions in Spinel-Rich Taxisitic Rocks of the Norilsk-Talnakh Intrusions, Polar Siberia // *Economic Geology*. 2020 a. V. 115. P. 1305–1320. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4748>.
15. Schoneveld L., Barnes S.J., Williams M., Le Vaillant M., Paterson D. Silicate and oxide mineral chemistry and textures of the Norilsk-Talnakh Ni-Cu-platinum group element ore-bearing intrusions // *Economic Geology*. 2020b. V. 115(6). P. 1227–1243. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4747>.
16. Sluzhenikin S.F., Yudovskaya M.A., Barnes S.J., Abramova V.D., Le Vaillant M., Petrenko D.B., Grigor'eva A.V., Brovchenko V.D. Low-Sulfide Platinum Group Element Ores of the Norilsk-Talnakh Camp // *Economic Geology*. 2020. V. 115. P. 1267–1303. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4749>.
17. Le Vaillant M., Barnes S.J., Mungall J.E., Mungall E.L. Role of degassing of the Noril'sk nickel deposits in the Permian-Triassic mass extinction event // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. V. 114. P. 2485–2490. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611086114>.