

Хлорапатит из пород малосульфидного горизонта Хараелахского интрузива в сравнении с апатитом из скаполитизированного метагаббро Одэгортен

Сущенко А. М.¹, Никулин И. И.², Грошев Н. Ю.¹, Пахомовский Я. А.¹, Михайлова Ю. А.¹, Калашников А. О.¹, Чернявский А. В.¹

¹ Геологический институт, Кольский научный центр РАН, Апатиты, a.sushchenko@ksc.ru

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, iinikulin@gmail.com

Аннотация. Приведены первые результаты детального изучения состава, внутреннего строения и ассоциации минералов группы апатита из пород малосульфидного (МС) горизонта Хараелахского интрузива (Норильский рудный район). В обогащенных хромитом и элементами платиновой группы (ЭПГ) хлорит-амфиболовых породах подтверждено широкое развитие хлорапатита, который образует сростки с фторапатитом и гидроксилapatитом. Сравнение этих пород со скаполитизированным метагаббро Одэгортен (Норвегия) показывает, что хорошо принявший полировку, гладкий, без дефектов полированной поверхности хлорапатит, по-видимому, является первичным минералом, по которому развиваются более поздние представители группы апатита, обладающие микропористым внутренним строением. При этом гидроксилapatит с низким содержанием фтора тяготеет к ассоциации с преобладанием хлорита, в то время как фторапатит и гидроксилapatит с высоким содержанием фтора ассоциирует преимущественно с амфиболом. Вопросы о природе хлорапатита из МС горизонта как первично-магматическом или метасоматическом минерале и о его связи с ЭПГ оруденением нуждаются в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: хлорапатит, элементы платиновой группы, малосульфидные руды, Одэгортен, Норильск.

Chlorapatite from rocks of the Low-Sulfide Horizon of the Kharaelakh intrusion in comparison with apatite from the Ødegården scapolitized metagabbro

Sushchenko A. M.¹, Nikulin I. I.², Groshev N. Yu.¹, Pakhomovsky Ya. A.¹, Mikhailova Yu. A.¹, Kalashnikov A. O.¹, Chernyavskiy A. V.¹

¹ Geological Institute, Kola Science Centre RAS, Apatity, a.sushchenko@ksc.ru

² LLC «Nornickel Technical Services», St. Petersburg, iinikulin@gmail.com

Abstract. The first results of detailed study of composition, internal structure and assemblages of apatite group minerals from rocks of the Low-Sulfide (LS) Horizon of the Kharaelakh intrusion (Norilsk ore district) are presented. In the chlorite-amphibole rocks enriched with chromites and platinum group elements (PGE), a wide development of chlorapatite, which forms intergrowths with fluorapatite and hydroxylapatite, was confirmed. A comparison of these rocks with the scapolitized metagabbro from Ødegården shows that well polished, smooth chlorapatite without defects of polished surfaces is a primary mineral, on which later members of apatite group with microporous internal structure develop. Low-fluorine hydroxyapatite tends to be in chlorite-dominated assemblages, while fluorapatite and high-fluorine hydroxyapatite associate predominantly with amphibole. Questions about the nature of chlorapatite from the MS horizon as a primary magmatic or metasomatic mineral and its relationship to PGE mineralization need further research.

Keywords: chlorapatite, platinum group elements, low-sulfide ores, Ødegården, Norilsk.

Введение

Апатит считается важным петрогенетическим индикатором (O'Sullivan, 2020). Значение геохимии минералов группы апатита для мафитовых пород подчеркивается в недавнем крупном петрологическом исследовании (Kieffer et al., 2024). В отношении такого минерала этой группы как хлорапатит, следует отметить, что он является относительно редким в мафитах и часто обнаруживает связь с платинометальным оруденением (Boudreau, 1986). Первые результаты наших ис-

следований Хараелахского интрузива показали, что хлорапатит из пикритовых габбро-долеритов, обогащенных элементами платиновой группы (ЭПГ), обладает первично-магматическими характеристиками и замещается поздним гидроксилapatитом, образующим вокруг него сравнительно редкие и тонкие каймы (Грошев и др., 2023). Продолжая изучать апатит Хараелахского интрузива, мы обнаружили, что в породах малосульфидного (МС) горизонта, содержащих десятки г/т ЭПГ (Sluzhenikin et al., 2020; Никулин и др., 2022), минералы группы апатита представлены сложными сростаниями хлорапатита, фторапатита и гидроксилapatита. В силу сложности этих сростаний, а также ввиду высокой степени вторичных изменений пород МС горизонта непросто ответить на вопрос: является ли хлорапатит в этих сростках первичным или вторичным минералом? В настоящей статье приводятся результаты петрографического и электронно-микроскопического исследования высокомагнезиальных, высокохромистых и обогащенных ЭПГ пород МС горизонта Хараелахского интрузива с упором на происхождении хлорапатита. Для ответа на вопрос, поставленный выше, мы используем сравнение с хорошо изученным хлорапатитом из метагаббро Одегортен (Engvik et al., 2009). Последнее расположено вблизи одного из типовых для хлорапатита местонахождений (co-type locality) – посёлка Крагерё в Норвегии.

Методика исследования

Петрографические особенности пород были изучены в прозрачных шлифах на оптическом микроскопе Axioplan II с видеокамерой. Диагностика и определение химического состава минералов для образцов 80/1613.1 и 80/1615.1 выполнены на сканирующем электронном микроскопе Leo 1450, оборудованном ЭДС-спектрометром Aztec Ultimmax 100 (ГИ КНЦ РАН). Детали методики приведены в (Грошев и др., 2023). В работе используется 41 состав минералов группы апатита из МС горизонта.

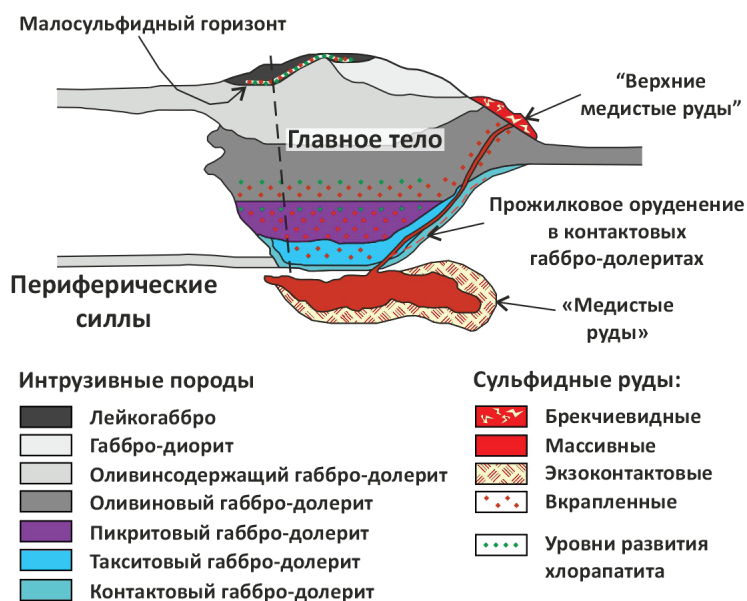


Рис. 1. Схематический обобщенный разрез интрузива норильского типа по Налдретту (2003), с изменениями. Необходимо отметить три уровня развития хлорапатита: пикритовые габбро-долериты, оливиновые габбро-долериты и породы МС горизонта. Штриховая линия показывает положение скважины.

Fig. 1. Schematic generalized section of the Norilsk-type intrusion according to Naldrett (2003), with modifications. Three levels of chlorapatite development should be noted: picritic gabbro-dolerites, olivine gabbro-dolerites and rocks of the Low-Sulfide Horizon. The dashed line shows the position of the borehole.

Результаты и обсуждение

Несмотря на то, что малосульфидные руды являются важнейшим источником ЭПГ в мире (Mudd, 2018), в России они пока не добываются, хотя несколько месторождений таких руд открыты на Кольском полуострове (Groshev et al., 2019) и положительная оценка их экономического потенциала дана для Норильского района (Ерыкалов и др., 2006). В последние годы число публикаций по малосульфидным рудам Норильска становится все больше, однако загадка о происхождении МС горизонта далека от решения. Главными дискуссионными вопросами являются: 1) модель формирования малосульфидных руд (Chayka et al., 2023 и ссылки там); 2) механизм образования лейкогаб-

броидов, вмещающих МС горизонт (Служеникин и др., 2016). В каждом из этих вопросов противопоставление магматических и метасоматических процессов играет важную роль.

МС горизонт Хараелахского интрузива располагается в нижней части лейкогаббро, образующего прерывистые слои и линзы мощностью до 25 м и залегающего над дифференцированным разрезом, в котором снизу вверх представлены подразделения контактовых, такситовых, пикритовых, оливиновых и оливинсодержащих габбро-долеритов, иногда с линзами габбро-диоритов (Sluzhenikin et al., 2020 и ссылки там). Малосульфидное оруденение находится в слое такситовых габбро-долеритов, разделяющих лейкогаббро и оливинсодержащие габбро-долериты. В изученной скважине ВФ-80бис этот слой вскрыт в интервале глубин 1613.1–1615.5 м. Оруденение связано с прослоями «пикритовидных» в керне пород, которыми сложены интервалы длиной от 5 до 40 см, расположенные в верхней и нижней частях такситовых габбро-долеритов. Петрографическая характеристика «пикритовидных» пород с глубин 1613.1 и 1615.1 м, содержащих в штучных пробах 20 и 32 г/т благородных металлов соответственно (Никулин и др., 2022), приводится далее.

Клиноцоизит(?)-амфибол-хлоритовая порода выявляется в образце 80/1613.1. Текстура мелкопятнистая, структура мелкозернистая, миндалекаменная, с участками фибронематобластовой и реликтовой (палимпсестовой) габбровой. Минеральный состав: хромшпинелид 10 %, сульфиды 3 %, амфибол 30 %, хлорит 40 %, клиноцоизит (?) 15 %, биотит 2 %.

В структуре породы можно выделить два типа участков, между которыми нет чётких границ. Первый тип: участки породы с миндалекаменной структурой. Миндалины овальной формы, раз-

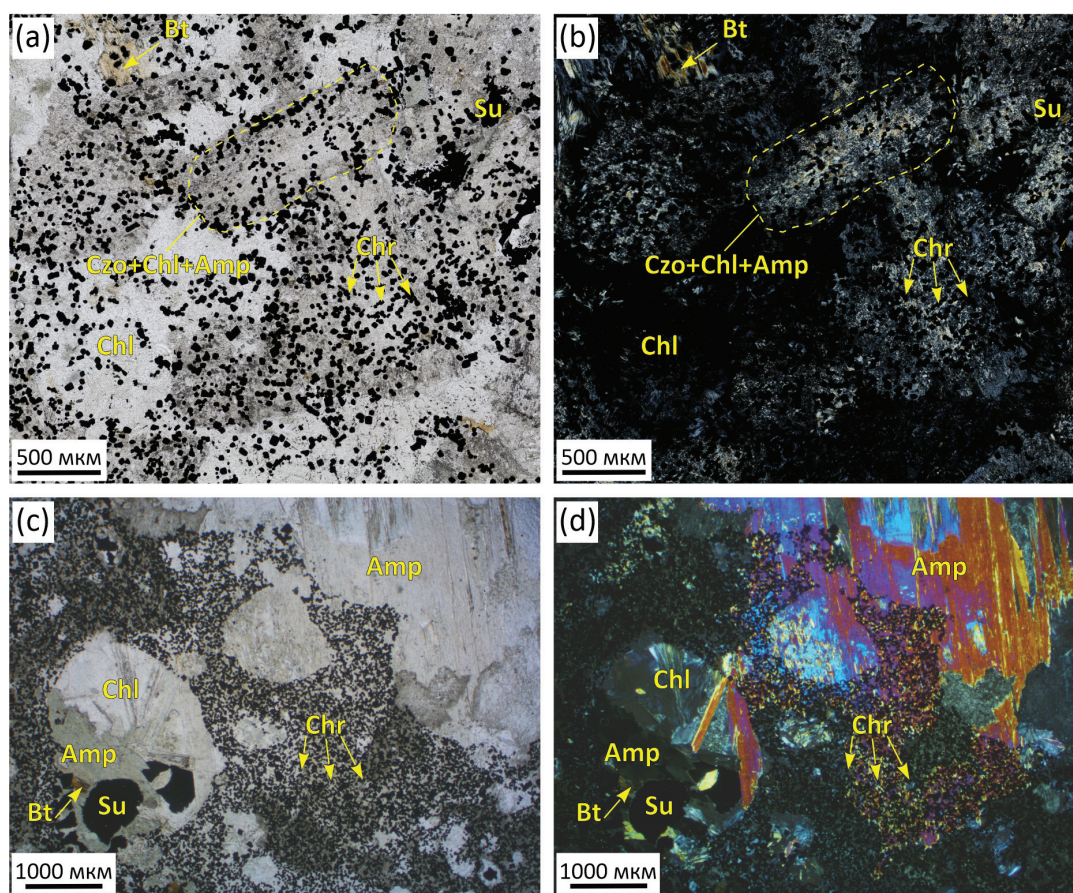


Рис. 2. Микрофотографии пород МС горизонта Хараелахского интрузива: а, б – образец 80/1613.1; с, д – образец 80/1615.1. а, с – без анализатора, с, д – николи скрещены. Сокращения: Amp – амфибол, Bt – биотит, Chl – хлорит, Chr – хромит, Czo – клиноцоизит, Su – сульфиды.

Fig. 2. Microphotographs of low-sulfide horizon rocks of the Kharaelakh intrusion: a, b – sample 80/1613.1; c, d – sample 80/1615.1. a, c – transmitted light, c, d – cross-polarized light. Abbreviations: Amp – amphibole, Bt – biotite, Chl – chlorite, Chr – chromite, Czo – clinozoisite, Su – sulfides.

мером от 0.2–0.3 мм до 3 мм. В составе миндалины находится амфибол тремолит-актинолитового ряда в сростании с биотитом, хлоритом, в отдельных случаях миндалины имеют зональное строение: по краям расположены пластинки хлорита, ближе к центру – амфибол в сростании с биотитом, в центре – выделения сульфидов. Наиболее часто миндалины сложены мономинеральным агрегатом мелкозернистого хлорита. Основная масса сложена на 20–25 % хромшпинелидом. Размер кристаллов хромшпинелида составляет сотые доли миллиметра, максимально – 0.1 мм. Пространство между зёрнами хромшпинелида заполнено мелкозернистой хлорит-амфиболовой массой.

Второй тип: участки породы с заметными фрагментами прямоугольной формы, размером до 0.5×2 мм, по форме соответствующие кристаллам плагиоклаза, сложенными микрозернистым клиноцоизит-амфиболовым агрегатом. Эти прямоугольные фрагменты окружены или мелкопластинчатой хлоритовой массой или ксеноморфными кристаллами амфибола. Форма выделений амфибола соответствует формам крупных ойкокристаллов пироксенов или амфиболов, которые характерны для мезо-лейкократовых габброидов различных магматических комплексов. Мелкозернистая хромшпинелидовая вкрапленность также присутствует и в этих участках породы, причем её общий рисунок такой же, как и в участках первого типа, то есть в равномерной хромшпинелидовой вкрапленности есть «окна», по форме и размерам соответствующие миндалинам. Но здесь, в отличие от участков первого типа, «окна» не заполнены материалом миндалины, однако в них достаточно чётко просматривается палимпсестовая габбровая структура породы.

Хлорит-амфибол-карбонатная порода с вкрапленным сульфидным оруденением, миндалинами и основной массой, насыщенной хромшпинелидом, определяется в образце 80/1615.1. Текстура пятнистая, структура разноминеральная средне-мелкозернистая, миндалекаменная с участками нематобластовой. Минеральный состав характеризуется следующими соотношениями: хромшпинелид 20 %, сульфиды 10 %, карбонат 30 %, амфибол 20 %, хлорит 20 %, биотит ед. з.

В структуре породы можно выделить миндалины и основную массу. Крупные миндалины имеют размер 3–7 мм в поперечнике, форма миндалины неправильная. Мелкие миндалины имеют овальную форму, размер 0.1–1 мм. Соотношение миндалины и основной массы приблизительно 1:1.

Крупные миндалины в центральной части сложены зёрнами сульфидов. Периферические части крупных миндалины состоят из моноклинного чуть зеленоватого амфибола тремолит-актинолитового ряда, карбоната и бесцветного хлорита. Карбонатом также заполнены трещинки в крупных зёрнах сульфидов. Амфибол представлен двумя морфологическими разновидностями: 1) мелкозернистый амфибол в составе хлорит-амфиболовых масс; 2) крупные метакристаллы размером до 7×10 мм, выходящие за пределы миндалины. По плоскостям спайности крупные метакристаллы амфибола содержат удлиненные вроски карбоната и агрегаты метельчатого хлорита, редкие пластинки биотита.

Мелкие миндалины сложены преимущественно метельчатыми агрегатами хлорита и карбонатом, реже в них также присутствуют метакристаллы амфибола. В центре некоторых мелких миндалины также находятся зёрна сульфидов. Часто карбонат образует кайму, а хлорит – центральную часть мелкой миндалины.

В составе основной массы примерно половину объема составляют идиоморфные кристаллы хромшпинелида, количество которого заметно больше по сравнению с таковым в образце 80/1613.1. Размер кристаллов хромшпинелида – сотые доли миллиметра, максимальный размер – 0.2 мм. Промежутки между кристаллами хромшпинелида заполнены амфиболом (преимущественно мелкозернистым агрегатом), хлоритом и карбонатом.

Среди второстепенных минералов в обеих породах встречаются альбит, калиевый полевой шпат, мусковит и другие фазы, диагностика которых выполнена при помощи электронного микроскопа. Сульфидные минералы преимущественно представлены миллеритом, халькопиритом, пиритом и галенитом. Встречаются сравнительно крупные зёрна минералов платиновых металлов – сперилита, изомертита, висоцита и котульскита.

Таким образом, несмотря на существующие представления о доминировании магматических процессов в образовании МС горизонта (Chayka et al., 2023), петрографические предпосылки позво-

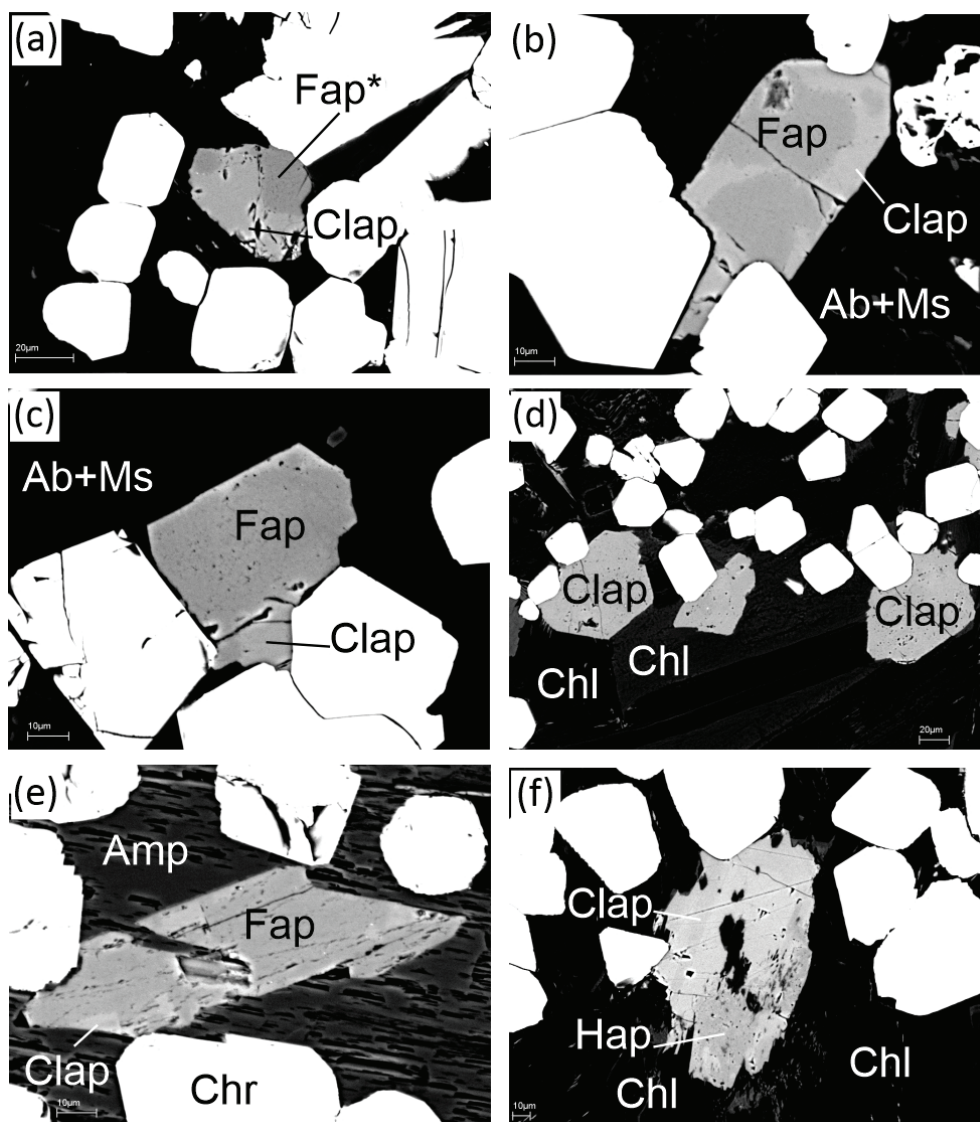


Рис. 3. BSE-изображения сростков минералов группы апатита из пород МС горизонта Хараелакского интрузива. (a–d) – обр. 80/1613.1; (e,f) – обр. 80/1615.1. Сокращения: Ab – альбит, Amp – амфибол, Ap – апатит, Chl – хлорит, Chr – хромшпинелид, Clap – хлорапатит, Fap – фторапатит, Fap* – гидроксилapatит, обогащенный фтором, Hap – гидроксилapatит, Ms – мусковит.

Fig. 3. BSE-images of apatite group mineral intergrowths from the low-sulfide horizon rocks of the Kharaelakh intrusion. (a–d) – sample 80/1613.1; (e, f) – sample 80/1615.1. Abbreviations: Ab, albite; Amp, amphibole; Ap, apatite; Chl, chlorite; Chr, chromspinelide; Clap, chlorapatite; Fap, fluorapatite; Fap*, fluorine-rich hydroxyapatite; Hap, hydroxyapatite; Ms, muscovite.

ляют рассматривать изученные породы как *метагаббро*, глубоко преобразованное в результате метасоматоза с привнесением хрома и летучих компонентов (H_2O , CO_2), а также серы и ЭПГ. При этом более измененная порода в образце 80/1615.1, не содержащая реликтов габбровой структуры, имеет более высокие концентрации ЭПГ. Следует отметить, что по данным валового анализа (химико-аналитическая лаборатория ГИ КНЦ РАН, аналитик М.Г. Тимофеева), изученное метагаббро МС горизонта не отличается от перекрывающего лейкогаббро и подстилающего оливинового габбро-диорита по содержанию хлора, концентрация которого ограничена 93 г/т.

В отношении распределения минералов группы апатита обе породы похожи тем, что зерна апатита встречаются как в миндалинах, так и в основной массе. Количество апатита, определенное по картам распределения Са и Р с помощью программы ISA 7.8 (Государственная..., 2023), в образце 80/1613.1 составляет 0.06 об. %, а в образце 80/1615.1 – 0.03 об. %. Максимальный размер зерна

составляет 180 мкм (80/1613.1). Подавляющее большинство зерен имеет размер менее 50 мкм: в образце 1613.1 таких зерен насчитывается 65 из 86, а в образце 1615.1 – 41 из 47.

Минералы группы апатита в образце 80/1613.1 можно условно разделить на следующие группы: 1) сростки гладкого хлорапатита и обогащенного гидроксил-ионом микропористого фторапатита (поле составов F_{ap} на рис. 4 а), включая обогащенный фтором гидроксилапатит (поле составов F_{ap}^* на рис. 4 а), где хлорапатит слагает от 25 до 75 % зерна (рис. 3 а), 2) те же сростки, где хлорапатит слагает от 3 до 25 % зерна (рис. 3 б), 3) отдельные зерна микропористого фторапатита, включая составы F_{ap}^* , с тонкими каемками и едва различимыми в BSE-режиме участками гладкого хлорапатита (рис. 3 с), 4) микропористый хлорапатит, обогащенный гидроксил-ионом (рис. 3 д). Доля каждой из первых трех групп в общем балансе апатита составляет примерно 30 %. Микропористый хлорапатит обнаружен в виде нескольких зерен на краю одной из хлоритовых миндалин.

В образце 80/1615.1, вдвое более «бедном» апатитом, можно наблюдать те же четыре группы. В зернах каждой из групп хлорапатит, как и в образце 80/1613.1, хорошо различим на BSE-изображениях и отличается своей хорошей полировкой от микропористого апатита состава полей F_{ap} и F_{ap}^* (более светлый в высоком контрасте, см. каемку на рис. 3 е). Отличием этого образца является отсутствие среди сростков четвертой группы пористого хлорапатита. Вместо таких зерен в эту группу здесь включены сростки гладкого хлорапатита с «бесфторным» гидроксилапатитом (рис. 3 ф). Такие сростки хлорапатита наблюдаются только в ассоциации с обильным хлоритом, в то время как для первых трех групп чаще встречается ассоциация с амфиболом.

Таким образом, породы МС горизонта Хараелахского интрузива содержат три типа апатита, различающиеся внутренним строением и составом: 1) гладкий хлорапатит, полированная поверхность которого не содержит дефектов; 2) микропористый высокофтористый апатит, состав которого соответствует полям F_{ap} и F_{ap}^* (рис. 4 а), а полированная поверхность характеризуется наличием множества мельчайших дефектов; 3) микропористый апатит с низким содержанием фтора (рис. 4 а).

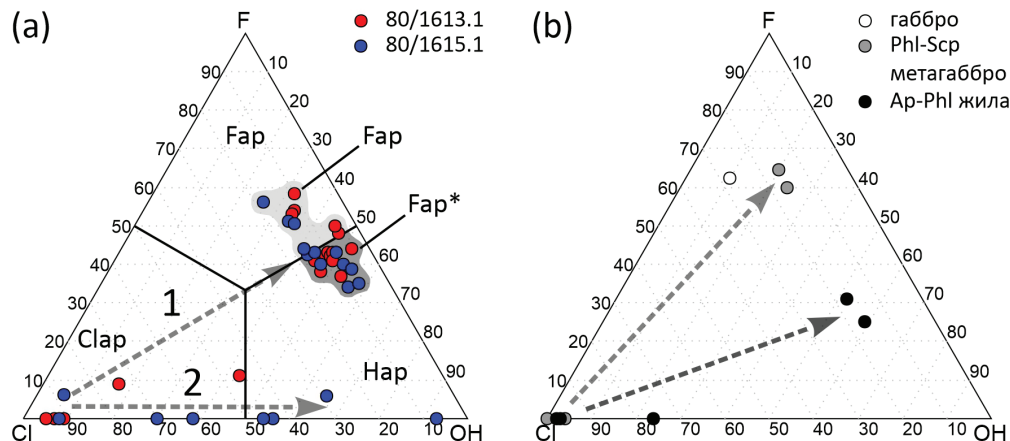


Рис. 4. Тройная диаграмма Cl-F-OH для апатита из МС горизонта Хараелахского интрузива (а) в сравнении с апатитом из пород и руд района Одэгортен (б). Необходимо отметить, что два типа сростков хлорапатита представлены в районе Одэгортен: одни сростки наблюдаются в скаполитовом метагаббро, другие – в апатит-флогопитовых жилах (б). Тем более интересным является присутствие аналогичных сростков хлорапатита в «метагаббро» Хараелахского интрузива (а), поскольку здесь они находятся в одной и той же породе. Сокращения: Ар – апатит, Клап – хлорапатит, Фар – фторапатит, Фар* – поле составов гидроксилапатита, обогащенного фтором, Нар – гидроксилапатит, Phl – флогопит, Scp – скаполит.

Fig. 4. CI-F-OH triple diagram for apatite from the low-sulfide horizon rocks of the Kharaelakh intrusion (a) in comparison with apatite from rocks and ores of the Ødegården area (b). Note that two types of chlorapatite intergrowths are represented in the Ødegården area: some intergrowths are observed in the scapolite metagabbro and others in apatite-phlogopite veins (b). The more interesting is the presence of similar types of chlorapatite intergrowths in the “metagabbro” of the Kharaelakh intrusion, since here they occur in the same rock (a). Abbreviations: Ap – apatite, Clap – chlorapatite, Fap – fluorapatite, Fap* – composition field of fluorine-rich hydroxyapatite, Hap – hydroxyapatite, Phl – phlogopite, Scp – scapolite.

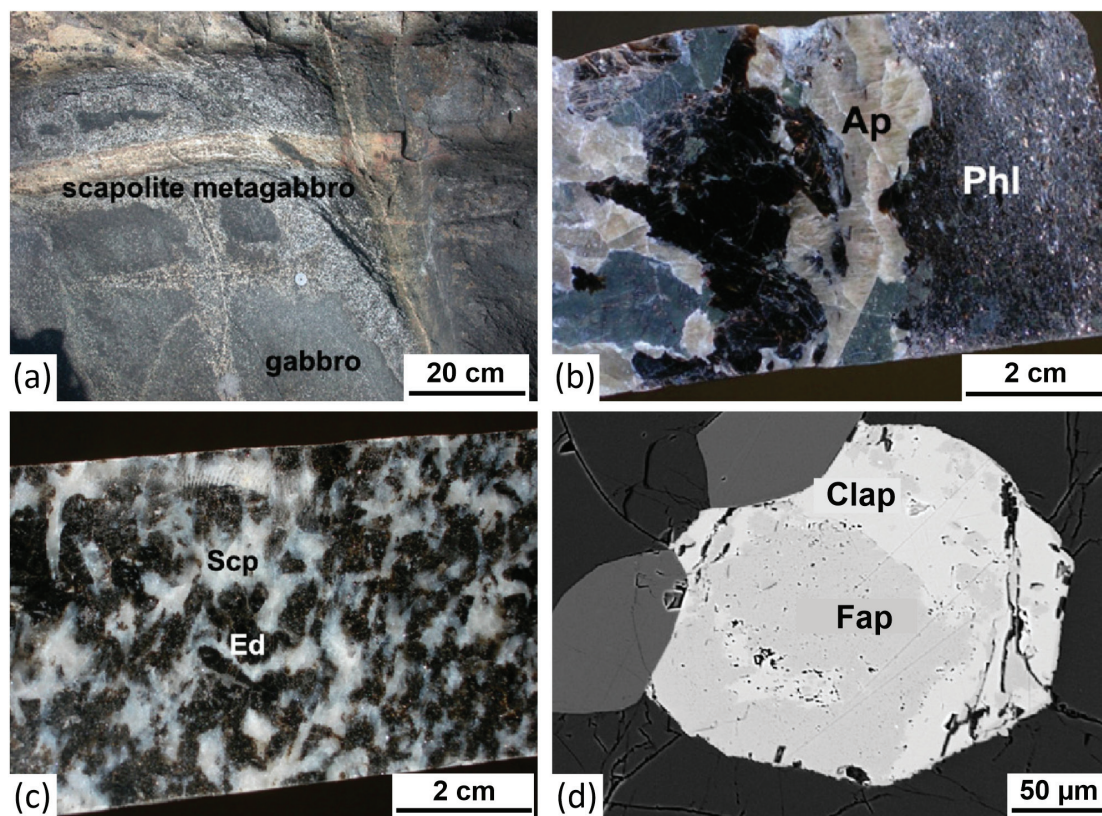


Рис. 5. Фотографии пород района Одэгортен. С изменениями по (Engvik et al., 2009). Фронт скаполитизации в габбро, которое превращается в метагаббро вдоль жил (а). Апатит (Ap) и флогопит (Phl) в жиле, вскрытой скважиной (b). С. Скаполитовое метагаббро, состоящее из скаполита (Scp) и эденита (Ed) (c). Хлорапатит (Clap), частично замещенный микропористым фторапатитом (Fap), из скаполитового метагаббро (d).

Fig. 5. Photos of rocks from the Ødegården area. Modified from (Engvik et al., 2009). Scapolitization front in gabbro that transforms into metagabbro along the veins (a). Apatite (Ap) and phlogopite (Phl) in the vein intersected by a borehole (b). Scapolite metagabbro composed of scapolite (Scp) and edenite (Ed) (c). Chlorapatite (Clap), partially replaced by microporous fluorapatite (Fap), from the scapolite metagabbro (d).

Разнообразие сростаний этих типов апатита (рис. 3) затрудняет определение последовательности их кристаллизации. Например, в случае преобладания хлорапатита в зерне, как на рисунках 3а и 3f, можно предположить его замещение фторапатитом на поздних стадиях кристаллизации. На рисунках 3b, 3c и 3e, напротив, его соотношение с пористым апатитом указывает на возможность поздней кристаллизации хлорапатита. Таким путем мы приходим к формулировке главного вопроса настоящего исследования: является ли хлорапатит, широко распространенный в МС горизонте, первичным минералом?

Сравним хлорапатит из МС горизонта с метасоматическим хлорапатитом из метагаббро Одэгортен, где метасоматический хлорапатит образует сходные незакономерные сростки с фторапатитом (Engvik et al., 2009). Шахты Одэгортен в Норвегии интересны в историческом аспекте как район добычи апатитовой руды, завершённой в середине прошлого века, а также как место, расположенное лишь в пяти км к востоку от поселка Крагерё, одного из типовых местонахождений хлорапатита. Апатитовые руды, в Одэгортен представлены метасоматическими жилами с апатитом и флогопитом (рис. 5b). Хлорапатит в жилах образует преимущественно зерна с «гладкой» полированной поверхностью, содержащие 5.1–6.7 мас. % Cl, которые по краям и трещинам внутри них замещаются пористым гидроксилapatитом примерно с 1.1 мас. % Cl (Engvik et al., 2009 и ссылки там).

Апатитовые жилы Одэгортен пересекают протерозойское метагаббро (Brickwood and Craig, 1987), формируя фронт скаполитизации (рис. 5а), представленный следующим рядом пород: габбро, эденитсодержащее скаполитовое метагаббро, обогащенное апатитом и флогопитом скаполи-

товое метагаббро, апатит-флогопитовая жила. По мере развития этого фронта, акцессорный «гладкий» магматический фторапатит (2.3 мас. % F, 1.9 мас. % Cl) из габбро в скаполитовом метагаббро (рис. 5 с, d) уступает место незакономерным сросткам «гладкого» хлорапатита (6.4 мас. % Cl без F) и пористого фторапатита (2.2 мас. % F, 1.1 мас. % Cl). Если интерпретировать эти сростки вне геологического контекста Одэгортен, то определение последовательности кристаллизации хлорапатита и фторапатита в метагаббро также является сложной задачей. Однако аналогичные взаимоотношения хлорапатита с явно поздним пористым гидроксилapatитом из апатит-флогопитовых жил позволяют заключить (Engvik et al., 2009), что пористый фторапатит в скаполитовом метагаббро представляет собой вторичное образование.

По аналогии мы приходим к выводу о том, что хлорапатит в породах МС горизонта является первичным минералом. Хлорапатит замещается микропористым апатитом состава полей *Fap* и *Fap** в ассоциации с амфиболом, а в тесной ассоциации с хлоритом – пористым гидроксилapatитом. Последовательность кристаллизации для апатита микропористого сложения представляет собой вопрос для дальнейших исследований, однако по ассоциации с хлоритом можно предположить, что наиболее поздним кристаллизовался низкофтористый гидроксилapatит. Другими словами, процесс замещения хлорапатита, показанный стрелкой 1 (рис. 4а), вероятно, предшествовал процессу, показанному стрелкой 2. Аналогичная последовательность намечена для района Одэгортен, где развитие вторичного гидроксилapatита по хлорапатиту связывается с поздней альбитизацией (Engvik et al., 2009).

Поскольку петрографические данные указывают на метасоматическую природу пород МС горизонта, хлорапатит, по-видимому, следует также предварительно рассматривать как метасоматический. Интересно при этом, что хлорапатит из пикритовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива представляет собой позднемагматический минерал (Грошев и др., 2023). Состав последнего эволюционирует в обратную сторону, вдоль непрерывного тренда, направленного в сторону состава чистого хлорапатита.

В развитие дискуссии интересно было бы рассмотреть состав рассеянных элементов в разных апатитах, что в настоящее время в полной мере можно сделать лишь для апатита из одэгортенского метагаббро, для которого сделаны анализы методом LA-ICP-MS. На рисунке 6 показаны составы метасоматического хлорапатита и развивающегося по нему вторичного пористого фторапатита, нормированные на состав акцессорного апатита из неизмененного габбро. Из рисунка хорошо видно, что метасоматический хлорапатит в сравнении с магматическим обогащен ванадием и немного барием, при обеднении кобальтом, никелем, стронцием, кадмием, легкими редкими землями, европием, а также вольфрамом, свинцом, торием и ураном. Вторичный фторапатит отличается от магма-

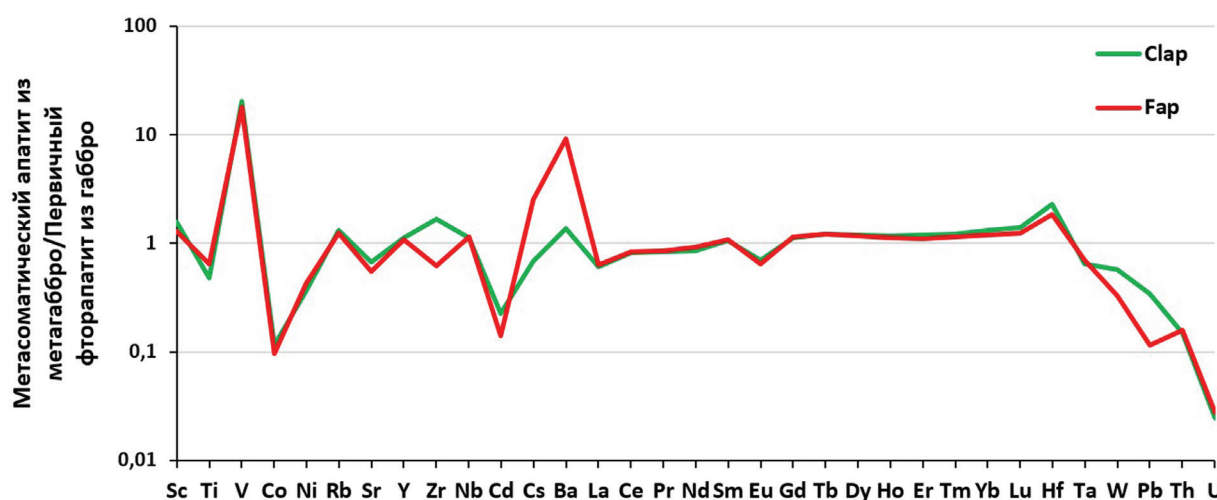


Рис. 6. Распределение рассеянных элементов в апатите района Одэгортен. По данным из (Engvik et al., 2009).
Fig. 6. Distribution of trace elements in apatite of the Ødegården area. According to data from (Engvik et al., 2009).

тического апатита из габбро теми же особенностями, с обеднением по титану и усилением обогащения по барью. Таким образом, редкоэлементный состав апатита является типоморфным и позволяет дискриминировать магматическую и метасоматическую обстановки образования. К сожалению, размер обнаруженных в настоящее время зерен апатита из пород МС горизонта затрудняет их изучение методом лазерной абляции.

Благодарности

Авторы благодарят к.г.-м.н. Т. В. Рундквист за конструктивные критические замечания.

Работа выполнена в рамках темы НИР FMEZ-2024-0004.

Литература

1. Государственная регистрация программы для ЭВМ 2023613774, 2023. <https://fips.ru/EGD/2026585c-1fdf-409b-aba3-70c5004a3a7e> (дата обращения 28.05.2024).
2. Грошев Н. Ю., Никулин И. И., Сущенко А. М., Михайлова Ю. А., Калашников А. О., Пахомовский Я. А., Кадыров Р. И. Состав апатита из пикритовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива: первые систематические данные по разрезу // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2023. № 20. С. 68–76. <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.007>.
3. Ерыкалов С. П., Третьяк В. И., Легезина О. П. Отчет о результатах оценочных работ на малосульфидные платиновые руды интрузии «Норильск-1» за 2000–2006 г. 7 книг, 2 папки. Талнах. 2006.
4. Налдретт А. Д. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: СПбГУ, 2003. 487 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19474441>.
5. 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>.
6. Служеникин С. Ф., Дистлер В. В., Григорьева А. В. Малосульфидные платиновые руды Норильского района – перспективные источники благородных металлов // Арктика: экология и экономика. 2016. № 4. С. 32–45.
7. Chayka I. F., Izokh A. E., Kamenetsky V. S., Sokol E. V., Lobastov B. M., Kontonikas-Charos A., Zelenski M. E., Kuttyrev A. V., Sluzhenikin S. F., Zhitova L. M., Shvedov G. I., Shevko A. Ya., Gora M. P. Origin of chromitites in the Norilsk-1 intrusion (Siberian LIP) triggered by assimilation of argillaceous rocks by Cr-rich basic magma // Lithos. 2023. V. 454. P. 107254. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107254>.
8. 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>.
9. Brickwood J. D., Craig J. W. Primary and re-equilibrated mineral assemblages from the Svecovorwegian mafic intrusions of the Kongsberg and Bamble areas, Norway // Bulletin-Norges geologiske undersokelse. 1987. V. 410. P. 1–23.
10. Engvik A. K., Golla-Schindler U., Berndt J., Austrheim H., Putnis A. Intragranular replacement of chlorapatite by hydroxy-fluor-apatite during metasomatism // Lithos. 2009. V. 112(3–4). P. 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.02.005>.
11. 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>.
12. Kieffer M. A., Dare S. A., Namur O., Mansur E. T. Apatite chemistry as a petrogenetic indicator for mafic layered intrusions // Journal of Petrology. 2024. V. 65. No. 4. <https://doi.org/10.1093/petrology/egae022>.
13. Mudd G. M., Jowitt S. M., Werner T. T. Global platinum group element resources, reserves and mining – A critical assessment // Science of the Total Environment. 2018. V. 622. P. 614–625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.350>.
14. O'Sullivan G., Chew D., Kenny G., Henrichs I., Mulligan D. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies // Earth-Science Reviews. 2020. V. 201. P. 103044. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103044>.
15. 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>.