

Минералы группы апатита в породах и рудах Федорово-Панского раннепротерозойского мафит-ультрамафитового расслоенного комплекса (Кольский полуостров)

Рундквист Т.В. , Грошев Н.Ю. , Сущенко А.М., Савченко Е.Э. 

Геологический институт, Кольский научный центр РАН, Апатиты, t.rundkvist@ksc.ru

Аннотация. Геохимия минералов группы апатита, по данным ряда авторов, может быть полезным ориентиром для оценки перспективности расслоенных интрузий в отношении элементов группы платины. Предполагается, что хлор в составе комплексных соединений участвует в переносе и концентрировании элементов группы платины. В связи с этим, были предприняты первые шаги в направлении изучения морфологии и состава минералов группы апатита в породах и рудах Федорово-Панского раннепротерозойского мафит-ультрамафитового расслоенного комплекса – крупнейшего платинометалльного объекта Кольского полуострова и европейской части АЗРФ. Минералы группы апатита распространены во всех массивах Федорово-Панского комплекса как акцессорные минералы. Чаще всего минералы группы апатита можно встретить в ассоциации с амфиболами, кварцем, биотитом, минералами группы эпидота, хлоритом, магнетитом и сульфидами в интерстициях между зернами плагиоклаза и пироксенов в лейкократовых разновидностях пород и руд комплекса. Результаты 60 ЭДС-анализов апатита из концентрата, выделенного из рудного анортозита Нижнего расслоенного горизонта Западно-Панского массива, показали, что минерал представлен гидроксилapatитом с содержаниями F до 1.65 мас. % и Cl до 0.34 мас. %.

Ключевые слова: минералы группы апатита, расслоенные интрузии, Федорово-Панский комплекс, Кольский полуостров.

Minerals of the apatite group in rocks and ores of the Fedorova-Pana Early Proterozoic mafic-ultramafic layered complex (Kola Peninsula)

Rundkvist T.V. , Groshev N.Yu. , Sushchenko A.M., Savchenko E.E. 

Geological Institute, Kola Science Centre RAS, Apatity, t.rundkvist@ksc.ru

Abstract. The geochemistry of minerals of the apatite group, according to a number of authors, can be a useful guideline for assessing the prospects of layered intrusions for the elements of the platinum group. It is assumed that chlorine in the complex compounds is involved in the transfer and concentration of the elements of platinum group. In this regard, the first steps were taken in studying the morphology and composition of the minerals of the apatite group in the rocks and ores of the Fedorova-Pana Early Proterozoic mafic-ultramafic layered complex, the largest platinum-metal object of the Kola Peninsula and the European part of the Russian Arctic. Minerals of the apatite group are common in all massifs of the Fedorova-Pana complex as accessory minerals. Most often, minerals of the apatite group can be found in association with amphiboles, quartz, biotite, minerals of the epidote group, chlorite, magnetite, and sulfides in interstices between plagioclase and pyroxene grains in leucocratic varieties of rocks and ores of the complex. Results of 60 EDS analyses of apatite from the mineral concentrate extracted from the ore-bearing anorthosite of the Lower layered horizon of the West Pana intrusion showed that the mineral is represented by hydroxylapatite with an F content of up to 1.65 wt. % and Cl up to 0.34 wt. %.

Keywords: minerals of the apatite group, layered intrusions, Fedorova-Pana complex, Kola Peninsula.

Введение

Минералы группы апатита в качестве акцессорных минералов постоянно встречаются в мафит-ультрамафитовых комплексах. Состав этих минералов, по мнению ряда исследователей, может быть использован в качестве индикатора при изучении минерало- и рудообразующих процессов. А.Е. Будро с соавторами (Boudreau et al., 1986) высказал предположение, что присутствие хлорапатита отражает насыщение магматического флюида хлором и является важным показателем платинометалльного рудогенеза. А.Е. Будро (Boudreau, 1993), развивая предположение о важности хлора в транспортировке платиноидов, провел сравнение состава минералов группы апатита

из интрузий блока Йилгарн (Западная Австралия) и комплекса Дулут (Миннесота, США) с этими минералами комплексов Бушвелд (ЮАР) и Стиллуотер (Монтана, США). Результат показал, что геохимия минералов группы апатита и других галогенсодержащих минералов может быть полезным ориентиром для оценки перспективности расслоенных интрузий в отношении элементов группы платины. Предполагается, что хлор в составе комплексных соединений участвует в переносе и концентрировании элементов группы платины. В.В. Рябов с соавторами (Рябов и др., 2018), изучая широкие вариации фтора и хлора в апатите расслоенных трапповых интрузий Сибирской платформы, предположил ведущую роль летучих компонентов в дифференциации расплава и рудообразовании.

Исследования А.Ю. Баркова и соавторов (Барков и др., 2021) показали сложную картину вариаций состава акцессорного апатита в различных частях платиноносного Мончегорского расслоенного плутона. Акцессорный хлорапатит развит в ранних ультрамафитовых кумулатах (или малосульфидном ЭПГ-содержащем горизонте нижней части разреза) Мончегорского плутона, а фторапатит кристаллизуется из наиболее фракционированных порций расплава в габброидных породах верхнего стратиграфического уровня (Барков и др., 2021). На диаграмме F–Cl–OH присутствуют широкие поля твёрдых растворов, представленные комбинациями компонентов хлорапатита, гидроксилапатита и фторапатита. Непосредственно на оси Cl–F точки составов полностью отсутствуют, авторы объясняют это тем, что в условиях низкотемпературной кристаллизации были стабильны моноклинные формы с преобладанием гидроксилапатитового и хлорапатитового компонентов, а бинарное замещение между компонентами моноклинного хлорапатита и гексагонального фторапатита явилось кристаллохимически затруднённым (Барков и др., 2021).

Во многих мафит-ультрамафитовых интрузиях присутствует хлорапатит, однако платинометалльное оруденение в них не обнаружено или незначительно (Järvinen et al., 2020). В других случаях, при наличии существенных рудных концентраций платиноидов, хлорапатит в породах и рудах не отмечался (Halkoaho et al., 1990). Сопоставление имеющихся на сегодняшний день литературных данных говорит о том, что петрогенетическое значение минералов группы апатита в связи с распространением платинометалльной минерализации в настоящее время нельзя считать вполне ясным.

В этом отношении интересен вопрос о распространении и составе минералов группы апатита в Федорово-Панском расслоенном комплексе – крупнейшем платинометалльном объекте Кольского полуострова и европейской части АЗРФ, где на сегодняшний день открыто четыре месторождения платиноидов и известно большое количество рудопроявлений (Митрофанов и др., 2013; Groshev et al., 2019).

Минералы группы апатита в Федорово-Панском комплексе

В настоящее время считается, что Федорово-Панский расслоенный комплекс состоит из четырех главных самостоятельных массивов (интрузий) в направлении с запада на восток: Федоровский (Федорова тундра), Ластьявр, Западно-Панский и Восточно-Панский массивы (Groshev et al., 2019).

Упоминание об апатите в породах Федоровой тундры имеется в статье Г.Н. Старицыной (1958). Г.Н. Старицына изучала габбропегматиты Федоровой тундры – небольшие гнездообразные и жилородные тела крупно-гигантозернистых пород, в состав которых входят ромбический и моноклинный пироксены, актинолит, обыкновенная роговая обманка, основной плагиоклаз (лабрадор-андезин), более кислый плагиоклаз (андезин-олигоклаз) в графических сростаниях с кварцем, биотит, хлорит, сульфиды, апатит, гранат, титаномagnetит. Г.Н. Старицына подчеркивает, что жилородные тела габбропегматитов отчетливо пересекают ксенолиты пироксенитов, встречающиеся среди норитов и габброноритов в приподошвенной части массива Федоровой тундры (Старицына, 1958). Сведений о составе апатита Федоровой тундры нами не найдено.

В Западно-Панском и в Восточно-Панском массивах минералы группы апатита, в качестве акцессорных минералов, встречаются повсеместно, чаще всего – в породах рудных зон. Петрографические исследования показали, что минералы группы апатита встречаются в составе нескольких минеральных ассоциаций. В анортозитах расслоенных горизонтов очень редко можно встретить мелкие (меньше 0.1 мм) кристаллы апатита, заключенные внутри зерен основного плагиоклаза.

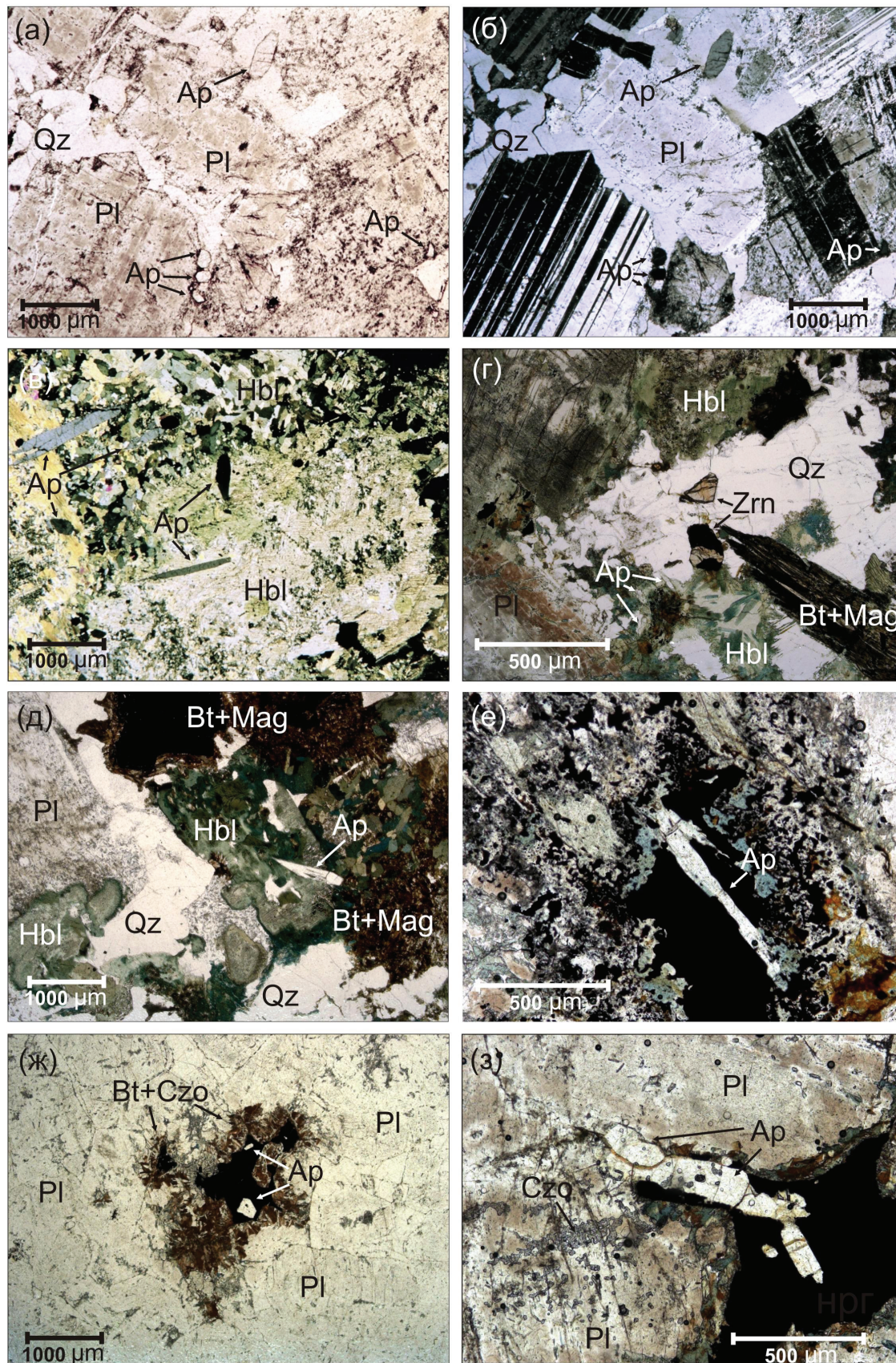


Рис. 1. Минералы группы апатита в породах и рудах Западно-Панского и Восточно-Панского массивов: а, б – апатит в анортозите, Восточно-Панский массив, участок Восточное Чуарвы, обр. 402/15,36; в – апатит в роговообманковой породе из габбропегматита, Восточно-Панский массив, участок Восточное Чуарвы, обр. 401/181,3; г – апатит в габбропегматите, Западно-Панский массив, Верхний расслоенный горизонт,

участок Южный Каменник, обр. 355/1341; д – апатит в габбропегматите, Западно-Панский массив, Нижний расслоенный горизонт, участок Восточный Киевей, обр. 50/187,9; е – апатит в сульфидной платинометалльной руде, Западно-Панский массив, Нижний расслоенный горизонт, участок Восточный Киевей, обр. 7300/1200; ж – апатит в сульфидно-силикатном вкраплении в анортозите, Западно-Панский массив, Нижний расслоенный горизонт, участок Восточный Киевей, обр. 7410/1170; з – апатит в анортозите с сульфидным оруденением, Западно-Панский массив, Нижний расслоенный горизонт, участок Восточный Киевей, обр. 8700/140. Микрофотографии прозрачных шлифов: а, г, д, е, ж, з – без анализатора, б, в – николи скрещены. Ап – апатит, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Bt – биотит, Czo – клиноцоизит, Mag – магнетит, Hbl – роговая обманка, Zrn – циркон.

Fig. 1. Minerals of the apatite group in the rocks and ores of the West Pana and East Pana massifs: а, б – apatite in anorthosite, East Pana massif, East Chuarvy site, sample 402/15.36; в – apatite in hornblende rock from gabbro-pegmatite, East Pana massif, East Chuarvy site, sample 401/181.3; г – apatite in gabbropegmatite, West Pana massif, Upper layered horizon, South Kamennik site, sample 355/1341; д – apatite in gabbro-pegmatite, West Pana massif, Lower layered horizon, East Kievev site, sample 50/187.9; е – apatite in sulfide platinum-metal ore, West Pana massif, Lower layered horizon, East Kievev area, sample 7300/1200; ж – apatite in sulfide-silicate phenocryst in anorthosite, West Pana massif, Lower layered horizon, East Kievev area, sample 7410/1170; з – apatite in anorthosite with sulfide mineralization, West Pana massif, Lower layered horizon, East Kievev area, sample 8700/140. Microphotographs of transparent sections: а, г, д, е, ж, з – in plane-polarized light; б, в – in cross-polarized light. Ап – apatite, Pl – plagioclase, Qz – quartz, Bt – biotite, Czo – clinozoisite, Mag – magnetite, Hbl – hornblende, and Zrn – zircon.

В анортозитах, лейкократовых габбро и габброноритах гораздо более распространен апатит, занимающий позицию между зернами основного плагиоклаза, в ассоциации с кварцем (рис. 1 а, б). Апатит образует длиннопризматические и веретенообразные бесцветные кристаллы длиной до 1 мм.

В габбропегматитах, особенно широко развитых в Восточно-Панском массиве на участке Восточное Чуарвы, апатит часто встречается в следующей минеральной ассоциации: актинолит, кальциевые амфиболы с повышенной железистостью (феррочермакит и ферропаргасит), кварц-олигоклазовый микрографический агрегат, ильменит, биотит, эпидот, хлорит, гранат, циркон, бадделит, рутил, магнетит, сульфиды, титанит и лейкоксен, гематит. Габбропегматиты такого типа встречаются также и Западно-Панском массиве, в Верхнем (ВРГ) и нижнем (НРГ) расслоенных горизонтах (рис. 1 в, г, д)

В рудных горизонтах Западно-Панского и Восточно-Панского массивов апатит часто присутствует в сульфидных вкраплениях в ассоциации с клиноцоизитом, биотитом, хлоритом (рис. 1 е, ж, з).

Состав минералов группы апатита ранее анализировался только в отдельных случаях. Результаты нескольких микрондовых анализов акцессорного апатита из анортозитов, габброноритов и габбропегматита Нижнего расслоенного горизонта приведены Р.М. Латыповым (1995). По данным Р.М. Латыпова, содержание Cl в гидроксилapatите из габбропегматита достигает 2.75 мас. %. В статье В.В. Субботина и его соавторов (Субботин и др., 2012) приведен состав апатита из мало-сульфидной руды участка Восточное Чуарвы Восточно-Панского массива с содержанием Cl, равным 3.32 мас. %.

Решая актуальную задачу определения состава минералов группы апатита, в различных породах и рудах Федорово-Панского комплекса, в первую очередь мы проанализировали минерал из рудоносного анортозита Нижнего расслоенного горизонта (обр. 66075P-1). Порода представляет собой крупнозернистый плагиоклазовый кумулат, сложенный зернами буроватого лабрадора (An 65) размером до 6 мм. Края зерен не окрашены и по составу соответствуют битовниту (An 82). Интерстициальное пространство сложено преимущественно амфиболизированными орто- и клинопироксеном, а также кварцем, биотитом, роговой обманкой, сульфидами и магнетитом (рис. 2). Сульфиды представлены пирротинном, пентландитом и халькопиритом. Сфалерит крайне редок. Среди акцессорных минералов отмечаются апатит, бадделит, барит, ильменит, клаусталит, титанит и циркон. Минералы благородных металлов встречаются в породе в виде мелких микронных включений, главным образом, в силикатах, окружающих сростки сульфидных минералов. К ним относятся арсенопалладинит, висоцкит, винцентит, меренскиит, мончеит, котульскит, рустебургит, теларгпалит, торнроозит и другие.

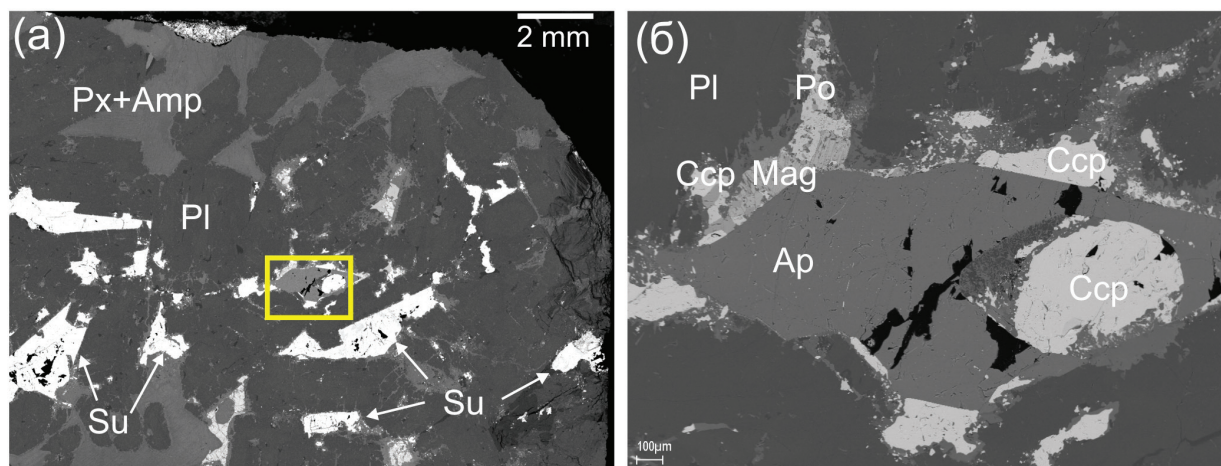


Рис. 2. Ассоциация минералов в обр. 66075P-1 (а); увеличенное изображение выделенного участка (б). BSE-изображение. Ap – апатит, Pl – плагиоклаз, Ccp – халькопирит, Mag – магнетит, Su – сульфиды, Pх – пироксен, Amp – амфибол.

Fig. 2. Association of minerals in sample 66075P-1 (a); enlarged image of the selected area (b). BSE image. Ap – apatite, Pl – plagioclase, Ccp – chalcopyrite, Mag – magnetite, Su – sulfides, Pх – pyroxene, Amp – amphibole.

Апатит в породе образует различные по морфологии зерна размером 300–600 мкм, в отдельных случаях – до 2 мм (рис. 2). Часто зерна содержат мельчайшие включения алланита-Се и монацита-Се. Из выделенного из породы апатита был приготовлен искусственный аншлиф 66075P-1. При помощи энерго-дисперсионного спектрометра Aztec UltimMax-100, установленном на сканирующем электронном микроскопе Zeiss EVO-25 в ЦКП КНЦ РАН, выполнены анализы апатита в 60 точках. По данным изучения состава встречается только гидроксилapatит с содержаниями F до 1.65 мас. % и Cl до 0.34 мас. %. Представительные анализы апатита из образца 66075P-1 приведены в таблице 1.

На диаграмме Cl-F-ОН (рис. 3) данные для образца 66075P-1 образуют компактное поле, показывая однородность концентрата апатита, выделенного из тридцатикилограммовой пробы. Данные Р.М. Латыпова распределены хаотично, однако эти данные показывают, что отдельные кристаллы апатита соответствуют граничным содержаниям между гидроксилapatитом и хлорапатитом. По-видимому, пристального внимания заслуживают минералы группы апатита в составе габбропегматитов, как из Западно-Панского, так и Восточно-Панского массивов.

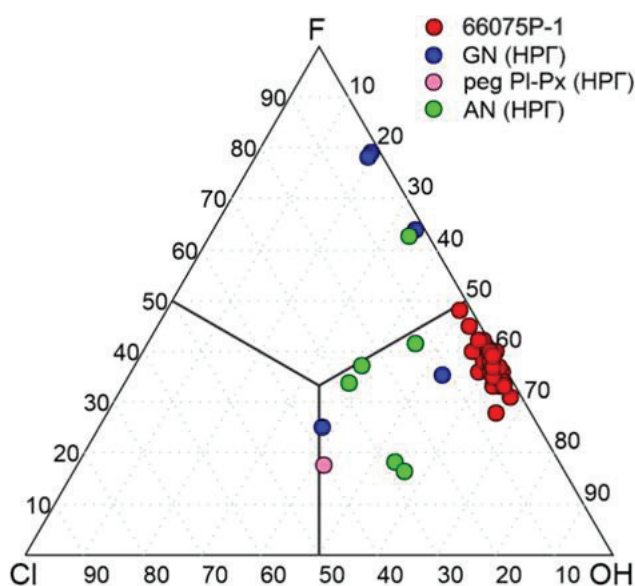


Рис. 3. Тройная диаграмма Cl-F-ОН для апатита Западно-Панского массива по данным из диссертационной работы Р.М. Латыпова (1995) в сравнении с апатитом из образца 66075P-1. Сокращения: GN – габбронорит, peg Pl-Px – пегматоидный плагиопироксенит, AN – анортозит, HPГ – Нижний расслоенный горизонт.

Fig. 3. Triangular Cl-F-ОН plot for apatite of the West Pana intrusion after R.M.Latypov's thesis (1995) compared to apatite from sample 66075P-1. Abbreviations: GN, gabbronorite; peg Pl-Px, pegmatoid plagiopyroxenite; AN, anorthosite, HPГ, Lower Layered Horizon.

Таблица 1. Представительные анализы апатита из рудоносного анортозита Нижнего расслоенного горизонта в Западно-Панском массиве (обр. 66075P-1).

Table 1. Representative analyzes of apatite from the ore-bearing anorthosite from the Lower Layered Horizon in the West Pana intrusion (sample 66075P-1).

№ анализов	1b1	1c–2–3	3b	3d	4a2	4d1	4d2	5a1	5c2	6a1
CaO	54.35	54.49	55.09	55.06	55.00	54.83	55.23	54.62	55.26	54.54
Fe ₂ O ₃	0.06	0.06	0.07	0.13	0.05	0.10	0.07	0.10	0.08	0.07
La ₂ O ₃	0.12	–	–	0.12	–	–	–	–	–	0.08
Ce ₂ O ₃	0.39	0.14	0.16	0.25	0.20	0.23	0.18	0.36	0.22	0.30
Nd ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.13
P ₂ O ₅	41.26	41.33	41.88	42.09	41.80	41.74	42.04	41.58	42.16	41.64
SiO ₂	0.38	0.21	0.21	0.25	0.26	0.26	0.22	0.39	0.25	0.29
F	1.53	1.17	1.44	1.41	1.51	1.09	1.38	1.53	1.45	1.42
Cl	0.03	0.14	0.11	0.17	0.10	0.46	0.34	0.29	0.25	0.15
O=F,Cl	0.65	0.52	0.63	0.63	0.66	0.56	0.66	0.71	0.67	0.63
Сумма	97.47	97.02	98.33	98.85	98.26	98.15	98.80	98.16	99.00	97.99
Формульные коэффициенты										
Ca	4.88	4.92	4.90	4.87	4.89	4.90	4.89	4.87	4.88	4.87
Fe	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
La	0.00	–	–	0.00	–	–	–	–	–	0.00
Ce	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Nd	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.00
P	2.93	2.95	2.94	2.94	2.94	2.95	2.94	2.93	2.94	2.94
Si	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
F	0.41	0.31	0.38	0.37	0.40	0.29	0.36	0.40	0.38	0.37
Cl	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02
ОН	0.59	0.67	0.61	0.61	0.59	0.65	0.59	0.56	0.59	0.60

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

Заключение

Минералы группы апатита распространены во всех массивах Федорово-Панского комплекса как акцессорные минералы. Чаще всего минералы группы апатита можно встретить в ассоциации с амфиболами, кварцем, биотитом, минералами группы эпидота, хлоритом, магнетитом и сульфидами в интерстициях между зернами плагиоклаза и пироксенов в лейкократовых разновидностях пород и руд комплекса.

В пробе из рудоносного анортозита Нижнего расслоенного горизонта встречается только гидроксилapatит с содержаниями F до 1.65 мас. % и Cl до 0.34 мас. %.

Литературные данные, имеющиеся на сегодняшний день, показывают, что в породах и рудах Федорово-Панского комплекса присутствует преимущественно гидроксилapatит, реже фторапатит. Содержание Cl в гидроксилapatите может достигать 2.75 мас. % (Латыпов, 1995) или 3.32 мас. % (Субботин и др, 2012). Однако поле составов апатита Федорово-Панского комплекса лишь едва касается области составов апатита из комплексов Бушвельд и Стиллуотер, которая почти полностью занимает поле хлорапатита на диаграмме Cl-F-ОН (Boudreau et al., 1986). Различия в составе апатита, по-видимому, указывают на различия в генезисе ЭПГ оруденения в указанных платиноносных комплексах. Для выяснения этих различий необходимы дальнейшие детальные исследования состава апатита Федорово-Панского комплекса.

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

Литература

1. Барков А.Ю., Шарков Е.В., Никифоров А.А., Королюк В.Н., Сильянов С.А., Лобастов Б.М. Вариации составов апатита и минералов редких земель в связи с трендами кристаллизации в расслоенном массиве Мончеплутон (Кольский полуостров) // Геология и Геофизика. 2021. Т. 62. № 4. С. 528–548. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG2020173>.
2. Латыпов Р.М. Нижний расслоенный горизонт интрузива Панских тундр: строение, рудоносность, петрогенезис: автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.г.-м.н. 04.00.08 СПб.: ИГГД, 1995. 16 с.
3. Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Грошев Н.Ю., Малич К.Н., Жиров Д.В., Митрофанов А.Ф. Восточно-Скандинавская и норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt-Pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 5. С. 357–373. <https://doi.org/10.7868/S0016777013050067>.
4. Рябов В.В., Симонов О.Н., Снисар С.Г. Фтор и хлор в апатитах, слюдах и амфиболах расслоенных трапповых интрузий сибирской платформы // Геология и Геофизика. 2018. Т. 59. № 4. С. 453–466. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20180403>.
5. Старицына Г.Н. К вопросу о генезисе габбро-пегматитов Федоровой тундры // Известия Карельского и Кольского филиалов АН СССР. 1958. № 2. С. 23–39.
6. Субботин В.В., Корчагин А.У., Савченко Е.Э. Платинометалльная минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1 С. 54–65.
7. 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>.
8. Boudreau A.E. Chlorine as an exploration guide for the platinum-group elements in layered intrusions // Journal of Geochemical Exploration. 1993. V. 48 (1). P. 21–37. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(93\)90080-6](https://doi.org/10.1016/0375-6742(93)90080-6).
9. 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>.
10. 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>.
11. 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>.