

УДК 549.02

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-3

**Sr-СОДЕРЖАЩИЕ ФОСФАТЫ НАДГРУППЫ АПАТИТА
ИЗ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД КОНДЕРСКОГО МАССИВА,
ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ****А.С. Осипов¹, А.А. Антонов², Н.С. Власенко¹**¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Университетская наб. 7-9, 199034 Россия; osipov.anst@yandex.ru² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), г. Санкт-Петербург, Средний пр. 74, 199106 Россия

Статья поступила в редакцию 16.08.2021 г., принята к печати 03.12.2021 г.

**Sr-BEARING PHOSPHATES OF THE APATITE SUPERGROUP
FROM THE ALKALINE ROCKS OF THE KONDER PLUTON,
KHABAROVSK KRAI****A.S. Osipov¹, A.A. Antonov², N.S. Vlasenko¹**¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Universitetskaya nab. 7-9, 199034 Russia; osipov.anst@yandex.ru² Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), St. Petersburg, Sredny pr. 74, 199016 Russia

Received 16.08.2021, accepted 03.12.2021

Аннотация. В работе представлено минералогическое описание Sr-содержащих фосфатов надгруппы апатита, обнаруженных в составе эвдиалит-эгирин-альбитовых пород Кондерского массива в Хабаровском крае. Для Sr-доминантных фаз характерна ассоциация с минералами группы лампрофиллита и титанитом, для Ca-доминантных – с кальциокатаплетом и кайнозитом-(Y), являющимися продуктами разрушения эвдиалита. Обнаруженные фосфаты, вероятно, формировались в процессе постмагматического преобразования вмещающей породы в следующей последовательности: стронадельфит → фторстрофит → Sr-фторапатит (фторкафит) → Na-PЗЭ-фторапатит. Вариации их химического состава указывают на снижение содержаний Sr, Ba и F и увеличение содержаний Ca, Na, PЗЭ и (ОН) в кристаллизационной среде. Установленная последовательность кристаллизации может отражать уменьшению щелочности минералообразующей среды.

Ключевые слова: стронадельфит, фторстрофит, фторкафит, высокостронциевый фторапатит, фторапатит, щелочные породы, гидротермальные преобразования, Кондерский массив, щелочно-ультраосновные комплексы.

Abstract. The paper presents a mineralogical description of Sr-bearing phosphates of the apatite supergroup found in eudialyte-aegirine-albite rocks of the Konder pluton, Khabarovsk krai. The Sr-dominant phases are associated with minerals of the lamprophyllite group and titanite, whereas the Ca-dominant phases are associated with calciocatapleite and kainosite-(Y), which are the products of the decomposition of eudialyte. The phosphates probably formed during post-magmatic alteration of host rock in a following sequence: stronadelphite → fluorostrophite → Sr-rich fluorapatite (fluorocaphite) → Na-REE-fluorapatite. Their variable chemical composition indicates decreasing Sr, Ba and F contents and increasing Ca, Na, REE and (OH) contents during crystallization. The crystallization sequence could reflect a decrease in alkalinity of the mineral-forming conditions.

Keywords: stronadelphite, fluorostrophite, fluorocaphite, Sr-rich fluorapatite, fluorapatite, alkaline rocks, hydrothermal alterations, Konder pluton, alkaline-ultramafic complexes.

Для цитирования: Осипов А.С., Антонов А.А., Власенко Н.С. Sr-содержащие фосфаты надгруппы апатита из щелочных пород Кондерского массива, Хабаровский край. Минералогия, 7(4), 48–61. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-3

For citation: Osipov A.S., Antonov A.A., Vlasenko N.S. Sr-bearing phosphates of the apatite supergroup from the alkaline rocks of the Konder pluton. Mineralogy, 7(4), 48–61. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-3.

Введение

Фторапатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ часто присутствует в составе магматических и метаморфических горных пород в качестве акцессорного, а в некоторых случаях – породообразующего минерала. При этом его структурные особенности обеспечивают широкий спектр изоморфных замещений, происходящих в ходе процесса кристаллизации и последующего преобразования горных пород. Как следствие, вариации химического состава минералов группы апатита могут дать представление о процессах формирования вмещающей породы.

Одним из характерных для фторапатита примесных элементов является стронций. Обычно он, наряду с натрием и легкими РЗЭ, обнаруживается в подчиненных количествах, изоморфно замещая Ca^{2+} в структуре минерала. Однако в щелочных и ультращелочных комплексах описаны апатитоподобные минералы, содержащие стронций в качестве видообразующего компонента. Пять из них – беловит-(Ce) $\text{NaCeSr}_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$, беловит-(La) $\text{NaLaSr}_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$, делонит $(\text{Na}_{0.5}\text{REE}_{0.25}\text{Ca}_{0.25})(\text{Ca}_{0.75}\text{REE}_{0.25})\text{Sr}_{1.5}(\text{CaNa}_{0.25}\text{REE}_{0.25})(\text{PO}_4)_3\text{F}_{0.5}(\text{OH})_{0.5}$, фторстрофит $\text{SrCaSr}_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$ и фторкафит $\text{SrCaCa}_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (Pasero et al., 2010) принадлежат к группе беловита, а стронадельфит $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ является стронциевым аналогом фторапатита (Рекон и др., 2010). Их всех можно отнести к условной системе $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X} - \text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{X} - \text{Na}_{2.5}\text{LREE}_{2.5}(\text{PO}_4)_3\text{X}$, где LREE – легкие РЗЭ, X – F, OH. В щелочных породах Кондерского массива (Хабаровский край) нами обнаружена серия Sr-содержащих фосфатов надгруппы апатита, минералогическому описанию которых посвящена представленная работа.

Геологическая позиция

Кондерский щелочно-ультраосновный массив находится в 800 км к северу от Хабаровска между р. Омня и р. Маймакан – левых прито-

ков р. Мая. Массив известен прежде всего как одно из крупнейших месторождений платины. Первые данные о коренной платиноносности ультраосновных пород интрузива были получены в 1957 г. С 1979 г. начинается детальное изучение массива, а с 1984 г. – промышленная отработка россыпной платины р. Кондер, которая продолжается до настоящего времени. За этот период было подготовлено большое количество публикаций, посвященных геологическому строению (Гурович и др., 1994; Некрасов и др., 1994), генезису (Орлова, 1991) и платиноидам (Лазаренков и др., 1992; Малич, 1999; Каретников, 2006; Мочалов, 2019) Кондерского массива. Однако щелочным породам массива, особенно их минералогии, уделялось значительно меньшее внимание (Гурович и др., 1994; Некрасов и др., 1994). Помимо россыпеобразующей ферроплатиновой минерализации, в пределах массива известно также коренное Cu-Pt-Pd оруденение, промышленную перспективность которого показали геологоразведочные работы 2013–2014 и 2019–2020 г. (Пилюгин, Бугаев, 2016; Гуревич, Полонянкин, 2016; Гуревич и др., 2020).

Кондерский массив расположен на северном склоне Батомгского выступа Алданского щита на пересечении двух глубинных разломов. На уровне современного эрозионного среза структура имеет в плане форму кольца диаметром до 8.5 км (рис. 1). Вмещающие породы представлены нижнеархейскими скарнированными мраморами, кристаллическими сланцами и кварцитами, а также среднерифейскими терригенными породами (аргиллитами, алевролитами и песчаниками). Интрузивные образования Кондерского массива представлены двумя группами пород различного состава и возраста. Большую часть площади массива составляют раннепротерозойские мафит-ультрамафитовые породы. К ним относятся дуниты, формирующие шток в центральной части интрузии, клинопироксениты, образующие кольцевую оторочку мощностью 50–750 м вокруг дунитового ядра, а также габбро и

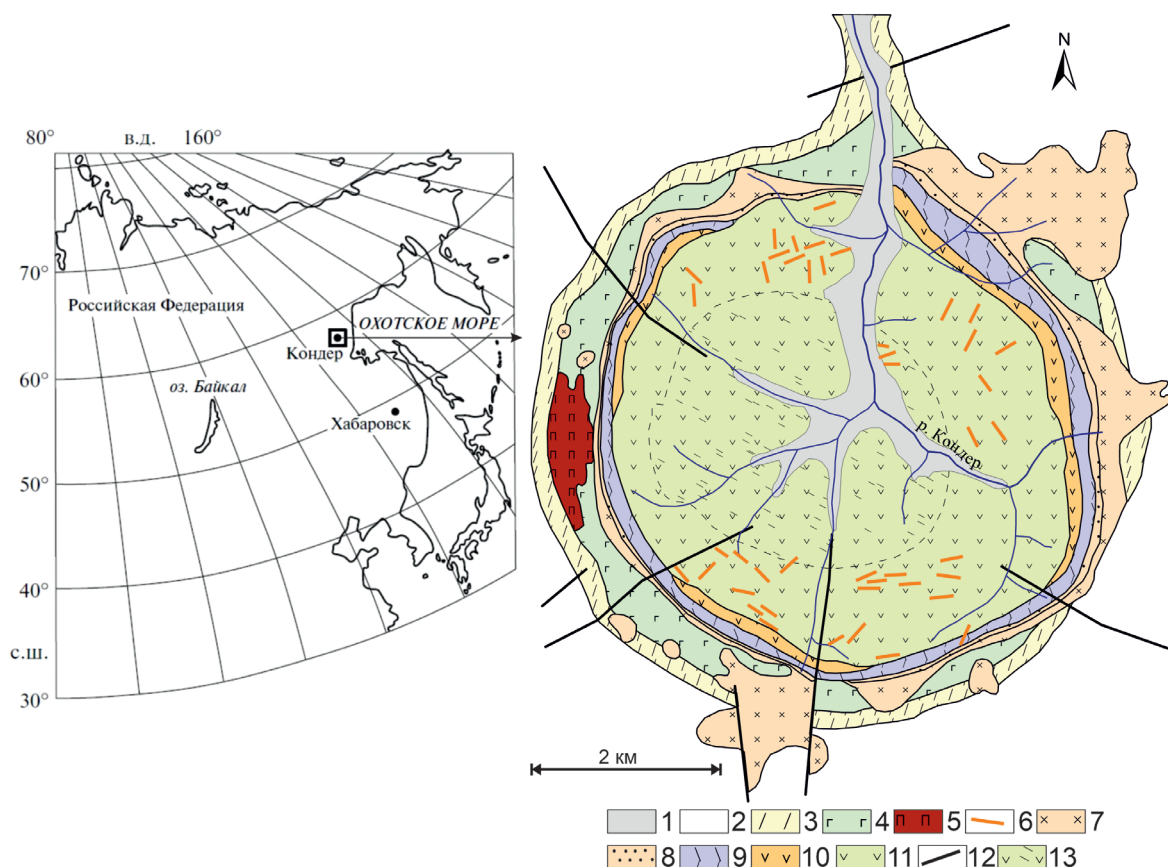


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кондерского массива (Гурович и др., 1994).

1 – рыхлые четвертичные отложения; 2, 3 – песчаники, алевролиты и ороговикованные аргиллиты; 4 – высокоглиноземистые и гиперстенсодержащие гнейсы, кварциты, мраморы; 5 – позднеархейские пегматоидные граниты; 6 – щелочные пегматиты; 7 – диориты, диорит-сиениты; 8 – меланократовые габброиды; 9 – косьвиты; 10 – пироксениты; 11 – дуниты; 12 – разрывные нарушения; 13 – поле интенсивного развития жильных и дайковых тел косьвитов в дунитах центральной части массива.

Fig. 1. Schematic geological map of the Konder pluton (Gurovich et al., 1994).

1 – unconsolidated Quaternary sediments; 2, 3 – sandstone, siltstone, hornfelized claystone; 4 – hypersthene-bearing and high-Al gneiss, quartzite, marble; 5 – Late Archean pegmatoid granite; 6 – alkali pegmatite; 7 – diorite, diorite-syenite; 8 – melanocratic gabbroids; 9 – kosvite; 10 – pyroxenite; 11 – dunite; 12 – faults; 13 – area of abundant kosvite in dunite veins and dike bodies in the center of the pluton.

косьвиты (богатые флогопитом, апатитом и титаномагнетитом клинопироксениты), представленные крупными концентрическими дугообразными телами на периферии клинопироксенитового кольца и многочисленными разноориентированными дайками в дунитах и клинопироксенитах. С косьвитами и их метасоматитами связано полиминеральное Cu-Pt-Pd оруденение.

Менее распространены породы щелочной серии и их пегматиты. Они формируют маломощные жильные тела, секущие раннепротерозойские дуниты и клинопироксениты, преимущественно, в краевой части массива. Предшественниками (Гурович и др., 1994; Некрасов и др., 1994) среди щелоч-

ных пород установлены сиениты и фельдшпатоидные сиениты (и их пегматиты), а также щелочные граниты. Нами отобраны и изучены пегматиты нефелин-сиенитового, сиенитового и ийолит-уртитового состава, а также вишневитовые и эвдиалит-эгирин-альбитовые породы (Osipov et al., 2018).

Материалы и методы исследования

Образцы для исследования были отобраны в 2013 г. в северной эндоконтактовой части Кондерского массива из жилы щелочных эвдиалит-эгирин-альбитовых пород. Жила имеет субширотное простирание, видимую протяженность

7–9 м, мощность 3–5 м. Вмещающие породы представлены пироксенитами. Исследования выполнялись в аншлифах на оборудовании ресурсных центров СПбГУ «Геомодель», «Рентгенодифракционные методы исследования вещества» и «Микроскопии и микроанализа». Изучение морфологии, химического состава и дифракции обратного рассеяния электронов (EBSD – *electron back-scattered diffraction*) проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с приставкой Oxford Instruments X-Max 20 и детектором Oxford Instruments Nordlys-HKLEBSD. Условия ЭДС анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 1.7 нА, рабочее расстояние 10 мм (аналитики Н.С. Власенко, В.В. Шиловских). Условия EBSD анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 1.5 нА, режим сфокусированного пучка с наклоном ступени 70° (аналитик Н.С. Власенко) Аналитическое программное обеспечение для сопоставления картин EBSD – Oxford Instruments AZtec HKL. Полированные срезы исследуемой породы предварительно подвергались реактивному ионному травлению (RIE) ионами Ag^+ с использованием прибора Oxford Instruments IonFab-300, работавшего при ускоряющем напряжении 500 В и токе потока 2.4 мА.

Минеральная ассоциация эвдиалит-эгирин-альбитовых пород

Основной объем эвдиалит-эгирин-альбитовых пород сложен эгирином и альбитом, формирующими плотную мелкокристаллическую матрицу, в которой наблюдаются второстепенные эвдиалит, лампрофиллит и реликтовые зерна калиевого полевого шпата. Эгирин образует спутанно-волокнистые агрегаты травяно-зеленых игольчатых кристаллов, свободное пространство между которыми заполнено мелкими (2–4 мм) кристаллами альбита. Главные минералы распределены неравномерно. В породе выделяются существенно эгириновые (до 75 об. %) и существенно альбитовые (до 90 об. %) участки, формирующие подобие «пятнистой» текстуры.

Лампрофиллит образует скопления (рис. 2а), реже – единичные кристаллы размером от 3–5 мм до 2 см. Как правило, минерал тяготеет к существенно альбитовым участкам либо к их границе с эгириновыми «пятнами». На общем фоне породы резко выделяются крупные (0.5–5 см) зональные

гипидиоморфные кристаллы и скопления гидратированного карбонатсодержащего манганозвдиалита (далее по тексту – звдиалита). Зональность индивидов звдиалита обусловлена процессами низкотемпературной гидротермальной переработки, в ходе которых происходило изменение химического состава и частичное разрушение минерала (Osipov et al., 2018). Скопления звдиалита в большинстве случаев расположены в пределах участков интенсивного развития эгирина.

На момент написания работы в звдиалит-эгирин-альбитовых породах нами обнаружено 24 акцессорных минерала. К ним относятся реликтовые зерна нефелина до 2–3 мм с прорастаниями анальцима и мусковита, а также датолит, пирофанит, монацит-(Ce), монацит-(Nd) и ксенотим-(Y). Размеры их выделений не превышают 300 мкм. Часть минералов тесно ассоциирует с кристаллами лампрофиллита. Так, в пределах его индивидов обнаружены реликты лоренценита, прорастания баритолампрофиллита, обогащенного фтором баритолампрофиллита и титанита. Другие акцессорные минералы пространственно связаны с индивидами звдиалита. Среди них наиболее распространен кальциокатаплект, формирующий псевдоморфозы по цирконосиликату. Акцессорные эльпидит, стилуэллит-(Ce), кайнозит-(Y) и перклевеит-(Ce) выполняют мелкие (50–250 мкм) пустоты в звдиалите и, скорее всего, являются продуктами его химического разложения (Пеков, 1998; Osipov et al., 2018). Вблизи кристаллов звдиалита также установлены ксеноморфные выделения сепиолита и нчванингита размером до 700–800 мкм, кальцит и гальгенбергит-(Ce). Карбонаты выполняют микротрещины и формируют каймы вокруг зерен альбита (Осипов, Антонов, 2021).

Морфология Sr-содержащих минералов

Все Sr-содержащие апатитоподобные фосфаты, обнаруженные нами в звдиалит-эгирин-альбитовых породах, являются акцессорными минералами. Они представлены несколькими минеральными видами, относящимися к различным минеральным ассоциациям.

Стронадельфит $Sr_5(PO_4)_3F$ встречается вблизи крупных кристаллов обогащенного фтором лампрофиллита в ассоциации с баритолампрофиллитом, обогащенным фтором баритолампрофиллитом и титанитом (рис. 2б). Минерал образует

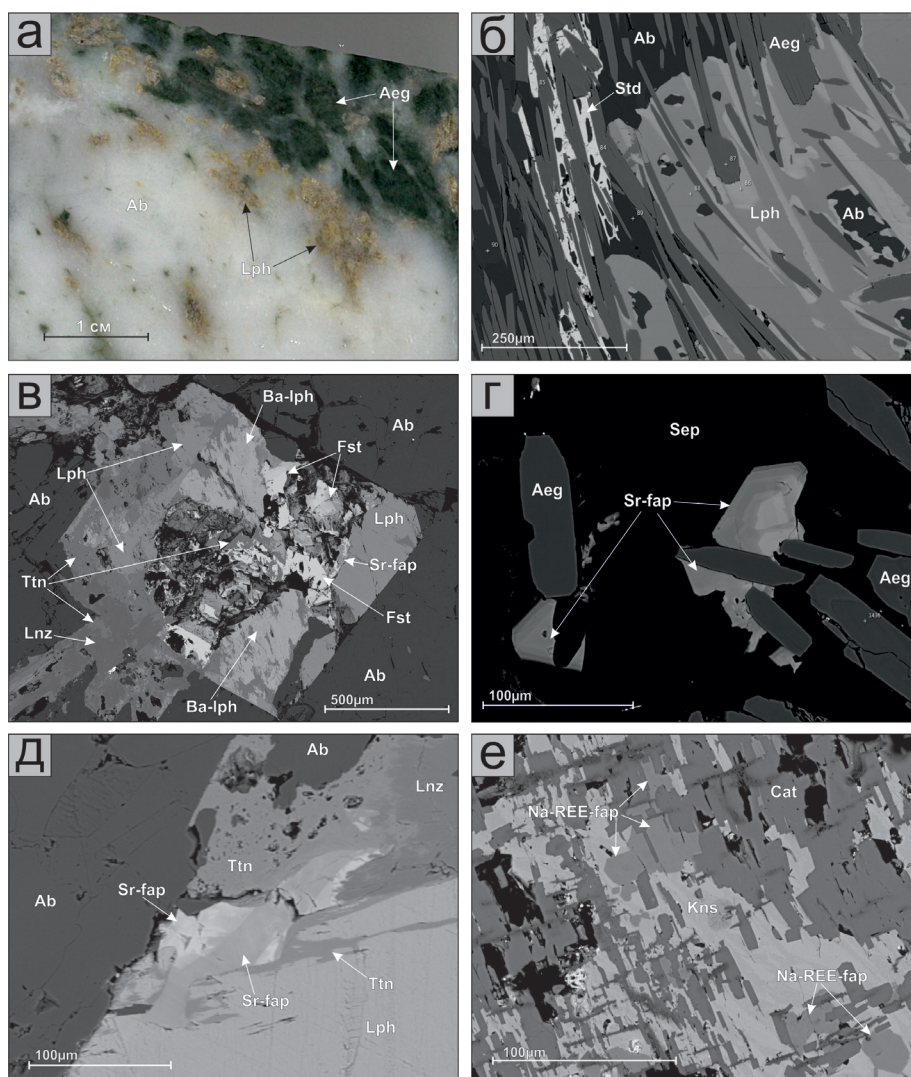


Рис. 2. Взаимоотношения минералов эвдиалит-эгирина-альбитовых пород Кондерского массива.

а – контакт эгирина (Aeg) и альбита (Ab) в эвдиалит-эгирина-альбитовой породе с включениями минералов группы лампрофиллита (Lph); б – ксеноморфный агрегат стронадельфита (Std), выполняющий пространство между кристаллами эгирина, альбита и лампрофиллита; в – корродированный кристалл лампрофиллита с реликтами лоренценита (Lnz), прорастаниями баритолампрофиллита (Ba-lph) и титанита (Ttn) в альбите и полостью с гипидиоморфными кристаллами фторострофита (Fst) и прорастаниями фторапатита, обогащенного Sr (Sr-fap); г – зональные гипидиоморфные кристаллы фторапатита, обогащенного Sr, на контакте с кристаллами эгирина в сепиолите (Sep); д – зерно фторапатита, обогащенного Sr, на границе кристалла лампрофиллита и альбита с прорастаниями титанита и реликтами лоренценита; е – развитие Na-РЗЭ-фторапатита (Na-REE-fap) в ассоциации с кальциокатаплеитом (Cat) и кайнозитом-(Y) (Kns) в полости выщелачивания в пределах кристалла эвдиалита.

Рис. 2б–е – BSE-фото шлифов.

Fig. 2. Relationships between minerals in eudialyte-aegirine-albite rock of the Konder pluton.

а – contact of aegirine (Aeg) and albite (Ab) in eudialyte-aegirine-albite rock with inclusions of minerals of the lamprophyllite (Lph) group; б – anhedral stronadelphite (Std) crystal between aegirine, albite and lamprophyllite crystals; в – replaced lamprophyllite crystal with lorentzenite (Lnz) relicts, baritolamprophyllite (Ba-lph) and titanite (Ttn) ingrowths in albite (Ab) and a cavity with subhedral fluorostrophite (Fst) crystals and ingrowths of Sr-bearing fluorapatite (Sr-fap); г – zoned subhedral Sr-bearing fluorapatite and aegirine (Aeg) in sepiolite (Sep); д – Sr-bearing fluorapatite grain in a cavity at the contact of lamprophyllite crystal and albite with ingrowths of titanite and lorentzenite relicts; е – Na-REE-fluorapatite (Na-REE-fap) in assemblage with calciocatapleite (Cat) and kainosite-(Y) (Kns) in the leaching cavity of the eudialyte crystal.

Figs. 2б–е – BSE images of polished sections.

ксеноморфные зерна до 400 мкм по удлинению и 150 мкм по ширине. Подробная минералогическая характеристика данного фосфата представлена в работе (Осипов и др., 2021).

Фторстрофит $\text{SrCaSr}_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$ обнаружен в полости выщелачивания в центральной части корродированного зерна лампрофиллита (рис. 2в). Как и стронадельфит, он ассоциирует с минералами группы лампрофиллита и титанитом, а также лоренценитом и высокостронциевым фторапатитом. Последний развивается внутри индивидов фторстрофита. Фторстрофит образует близкие к гипидиоморфным кристаллы размером до 250 мкм. В аншлифе минерал серовато-белого цвета, полупрозрачный.

Фторапатит $(\text{Ca})_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ представлен двумя разновидностями, отличающимися по минеральной ассоциации и содержанию примесных компонентов. Один из них, высокостронциевый фторапатит $(\text{Ca},\text{Sr})_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (далее Sr-фторапатит), наиболее широко распространен среди апатитоподобных фосфатов. В породе он встречается как вблизи индивидов лампрофиллита и в срастании с ними (рис. 2в, д), так и вблизи кристаллов эвдиалита (рис. 2г). В первом случае минерал формирует ксеноморфные выделения размером до 350 мкм, а во втором – гипидиоморфные кристаллы размером от 25–100 мкм. Как правило, вне зависимости от ассоциации, в обратно-рассеянных электронах отчетливо проявлена зональность индивидов Sr-фторапатита. В аншлифе минерал полупрозрачный, серовато-белый, отмеченная выше зональность не различима.

Другая разновидность фторапатита характеризуется повышенными содержаниями Na и $\sum(\text{PЗЭ} + \text{Y})$ и далее будет называться Na-PЗЭ-фторапатит с упрощенной формулой $(\text{Ca},\text{Na},\text{REE},\text{Sr})_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$. Минерал встречается внутри концентрически-зональных зерен гидратированного карбонатсодержащего аналога манганозвдиалита в ассоциации с поздними низкотемпературными минералами – кайнозитом-(Y), кальциокатаплеитом и перклевеитом-(Ce) (рис. 2е). Na-PЗЭ-фторапатит образует гипидиоморфные кристаллы в массе кайнозита-(Y), а также выполняет полости между агрегатами кальциокатаплеита. Некоторые зерна характеризуются слабовыраженной зональностью в обратно-рассеянных электронах, при этом центральная часть зональных индивидов характеризуется более низкой электронной плотностью.

Химический состав Sr-содержащих минералов

Основными видообразующими компонентами всех апатитоподобных минералов в эгирин-альбитовых породах Кондерского массива являются Ca и Sr, в зависимости от соотношения которых минералы относятся к тому или иному виду. Содержания примесей, к которым относятся Ba, Na, Y, PЗЭ, Fe, As, Ti, Si, широко варьируют (табл.).

В составе стронадельфита содержания главных элементов находятся в следующих пределах (мас. %): 59.54–62.38 SrO (в среднем 60.89), 27.52–31.14 P_2O_5 (в среднем 29.86), 2.33–3.51 F (в среднем 3.03). Главным примесным компонентом является Ca, в меньших количествах стабильно присутствуют Ba, в части анализов отмечены Fe и Na (мас. %): 3.80–5.62 CaO (в среднем 4.74), 0.79–2.38 BaO (в среднем 1.41), 0.00–0.52 FeO (в среднем 0.24), 0.00–0.36 Na_2O (в среднем 0.15). Рассчитанная (Булах и др., 2014) по средним содержаниям элементов на 25 зарядов эмпирическая формула минерала имеет вид: $(\text{Sr}_{4.22}\text{Ca}_{0.61}\text{Ba}_{0.07}\text{Na}_{0.03}\text{Fe}_{0.02})_{4.96}(\text{P}_{3.02}\text{O}_{11.93})\text{F}_{1.15}$.

В составе фторстрофита Ca уже является видообразующим. Содержания главных элементов в минерале составляют (мас. %): 50.63–57.23 SrO (среднее 53.30), 30.43–33.05 P_2O_5 (среднее 31.77), 8.53–13.83 CaO (среднее 10.24), 1.59–3.49 F (среднее 2.46). Из примесей практически всегда присутствуют Ba, Na, Ce, реже – La, один раз был отмечен Ti (мас. %): 0.00–1.57 BaO (среднее 0.78), 0.00–0.56 Na_2O (среднее 0.33), Ce_2O_3 0.00–1.72 (среднее 1.02), La_2O_3 0.00–1.22 (среднее 0.34), TiO_2 – 0.94. Рассчитанная по средним содержаниям элементов на 25 зарядов упрощенная формула минерала имеет вид: $(\text{Sr}_{3.49}\text{Ca}_{1.24}\text{Na}_{0.07}\text{Ce}_{0.04}\text{Ba}_{0.03}\text{La}_{0.01})_{4.90}(\text{P}_{3.04}\text{Ti}_{0.01}\text{O}_{12.00})_{0.88}(\text{OH})_{0.12}$.

Впервые фторстрофит был описан в 1962 г. в породах щелочного массива Инагли, Республика Саха (Якутия) (Ефимов и др., 1962). В отличие от фторапатита (как и стронадельфита, обнаруженного позднее) в структуре фторстрофита происходит разделение 4 позиций $M1$ на две пары $M1$ и $M1'$ с переходом от пространственной группы $\text{P}6_3/m$ к $\text{P}6_3$ (Клевцова, 1964). Кристаллохимическая формула типового образца минерала – $^{M1}[(\text{Sr},\text{Ba})]^{M1'}[\text{Ca}]^{M2}[\text{Sr}_{2.05}\text{Ca}_{0.30}\text{A}_{0.15}](\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH})$, где A – PЗЭ, Na (Клевцова, 1964). Позднее аналогичная по составу и структуре фаза была обнаружена в пределах г. Расвумчорр Хибинского массива (Кольский

Таблица

Средний химический состав (мас. %) минералов надгруппы апатита

Table

Average chemical composition (wt. %) of minerals of the apatite supergroup

Компонент	Стронгелит			Фторстронгелит			Sr-фторапатит			Na-РЗЭ-фторапатит		
	n = 4			n = 12			n = 22			n = 21		
	Ср.	Мин.	Макс.	Ср.	Мин.	Макс.	Ср.	Мин.	Макс.	Ср.	Мин.	Макс.
P ₂ O ₅	29.86	27.52	31.14	31.77	30.43	33.05	38.17	36.50	40.61	37.39	34.78	38.58
SiO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.17	—	2.52
TiO ₂	—	—	—	0.08	—	0.94	0.04	—	0.79	—	—	—
As ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	0.03	—	0.71	—	—	—
Y ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.13	—	2.79
La ₂ O ₃	—	—	—	0.34	—	1.22	0.22	—	2.20	0.93	0.36	1.48
Ce ₂ O ₃	—	—	—	1.02	—	1.71	0.55	—	4.57	3.74	2.54	4.30
Pr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.65	—	1.01
Nd ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	0.16	—	1.09	4.53	3.18	5.60
Sm ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.86	0.49	1.22
Gd ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.09	—	0.53
SrO	60.89	59.54	62.38	53.30	50.36	57.23	17.57	6.00	32.03	3.76	1.96	7.43
CaO	4.74	3.80	5.62	10.24	8.53	13.83	39.72	30.28	49.88	40.85	38.68	41.80
BaO	1.41	0.79	2.38	0.78	—	1.57	—	—	—	—	—	—
FeO	0.24	—	0.52	—	—	—	0.09	—	0.39	—	—	—
Na ₂ O	0.15	—	0.36	0.33	—	0.56	0.35	—	1.54	2.07	1.82	3.00
F	3.03	2.33	3.51	2.46	1.59	3.49	2.70	2.05	3.19	2.41	1.41	3.85
H ₂ O _{расч.}	—	—	0.18	0.16	—	0.55	0.33	0.10	0.59	0.46	—	0.93
—O = F ₂	–1.28	—	—	–1.03	—	—	–1.14	—	—	–1.01	—	—
Сумма	99.04	—	—	99.45	—	—	98.80	—	—	97.00	—	—

Примечание. n – число анализов; пустые ячейки – содержания элемента ниже порога обнаружения; ср., мин., макс. – среднее, минимальное и максимальное значения, соответственно.

Note. n – number of analyses; empty box – element content is below detection limit; ср., мин., макс. – average, minimum and maximum contents, respectively.

полуостров). Ее кристаллохимическая формула – $^{M1}[\text{Sr}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}]^{M1'}[\text{Ca}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}]^{M2}[\text{Sr}_{2.6}\text{Ca}_{0.4}](\text{PO}_4)_3\text{F}$ (Pushcharovsky et al., 1987). Исходя из вышесказанного, кристаллохимическая формула обнаруженного нами минерала может быть записана следующим образом: $^{M1}[\text{Sr}_{0.97}\text{Ba}_{0.03}]^{M1'}[\text{Ca}_{1.00}]^{M2}[\text{Sr}_{2.52}\text{Ca}_{0.24}\text{Na}_{0.07}\text{Ce}_{0.04}\text{La}_{0.01}](\text{P}_{3.04}\text{Ti}_{0.01}\text{O}_{12.00})[\text{F}_{0.88}(\text{OH})_{0.12}]$. По соотношению Sr/Ca и составу элементов-примесей фторстронгелит Кондерского массива близок к минералу из массива Инагли.

Са-доминантный Sr-фторапатит содержит (мас. %) 30.28–49.88 CaO (среднее 39.72), 36.50–40.61 P₂O₅ (среднее 31.77), 2.05–3.19 F (среднее 2.70). При этом содержания SrO сильно варьируют от 6.00 до 32.03 мас. % (в среднем 17.57 мас. %). Наиболее частыми примесями являются натрий и железо, менее характерны церий, лантан и неодим (мас. %): 0.00–0.39 FeO (среднее 0.09), 0.00–4.57 Ce₂O₃ (среднее 0.55), 0.00–2.22 La₂O₃ (среднее, 0.22), 0.00–1.09 Nd₂O₃ (среднее 0.16). В одном

анализе также отмечено 0.79 мас. % TiO₂ и 0.71 мас. % As₂O₃. Рассчитанная по средним содержаниям элементов на 25 зарядов упрощенная формула минерала имеет вид: $(\text{Ca}_{3.95}\text{Sr}_{0.95}\text{Na}_{0.06}\text{Ce}_{0.04}\text{La}_{0.01}\text{Nd}_{0.01}\text{Fe}_{0.01})_{5.01}(\text{P}_{3.00}\text{O}_{12.00})\text{F}_{0.79}(\text{OH})_{0.21}$.

Зональность минерала была проанализирована на примере индивида, обнаруженного вблизи корродированного кристалла эвдиалита. EBSD анализ показал, что индивид Sr-фторапатита представлен блочным монокристаллом (рис. 3в, г). На BSE изображении видно, что центральные зоны кристалла имеют более высокую электронную плотность, чем краевые (рис. 3а). Это является следствием более высокого содержания Sr²⁺ в центре – от 1.07 до 1.20 ф.к., в то время как промежуточные зоны содержат от 0.56 до 0.88 ф.к., а краевые – от 0.34 до 0.47 ф.к.. По всей видимости, зональность кристаллов носит осцилляционный характер, при этом по мере кристаллизации минерала содержания Sr уменьшались.

др., 1997). Позднее несколько новых находок фторкафита были сделаны в Хибинском и Ловозерском массивах на Кольском полуострове (Yakovenchuk et al., 1997; Chackmouradian et al., 2005) и в районе Тича (Западные Карпаты, Чехия) (Kropáč et al., 2017).

Для проверки данного предположения был применен метод EBSD. Правильность структурной идентификации минерала определяется величиной среднего углового отклонения между картиной Кикучи, рассчитанной по модельной кристаллической структуре, и картиной обратного рассеяния электронов, полученной с изучаемой фазы. При сравнении картин Кикучи, полученных с центральной части зонального зерна Sr-фторапатита (рис. 3д), с эталонными структурами фторапатита (ICSD: 80121) и фторкафита (Chackmouradian et al., 2005) было получено среднее угловое отклонение 0.21° и 0.23° соответственно по 10 полосам совпадения. Его низкое значение позволяет с уверенностью отнести минерал к структурному типу апатита. При этом точность метода EBSD недостаточна для разделения фаз со столь близкими структурными параметрами, в то же время использовать более точные рентгеноструктурные исследования в нашем случае затруднительно, ввиду невозможности выделить монофракцию фторкафита из зональных кристаллов Sr-фторапатита.

В составе Na-PЗЭ-фторапатита главными элементами являются Ca и P (мас. %): 38.68–41.80 CaO (среднее 40.85), 34.78–38.58 P₂O₅ (среднее 37.39), 1.41–3.85 F (среднее 2.41). От других минералов надгруппы апатита, обнаруженных в эвдиалит-эгирин-альбитовых породах, он отличается более высокими содержаниями Na₂O (1.82–3.00 мас. %, среднее 2.07), а также меньшей примесью SrO (1.96–7.43 мас.%, среднее 3.76). Кроме того, в его составе присутствует большее число PЗЭ, встречается примесь Si и в единичном случае отмечен Y (мас. %): 3.18–5.60 Nd₂O₃ (среднее 4.53), 2.54–4.30 Ce₂O₃ (среднее 3.74), 0.36–1.48 La₂O₃ (среднее 0.93), 0.49–1.22 Sm₂O₃ (среднее 0.86), 0.00–1.01 Pr₂O₃ (среднее 0.65), 0.00–0.53 Gd₂O₃ (среднее 0.09), 0.00–1.09 Nd₂O₃ (среднее 0.16), 0.00–2.52 SiO₂ (среднее 0.17), Y₂O₃ – 2.79. Рассчитанная по средним содержаниям элементов на 25 зарядов упрощенная формула минерала имеет вид: $(\text{Ca}_{4.10}\text{Na}_{0.38}\text{Sr}_{0.20}\text{Nd}_{0.15}\text{Ce}_{0.13}\text{La}_{0.03}\text{Sm}_{0.03}\text{Pr}_{0.02}\text{Y}_{0.01})_{5.05}(\text{P}_{2.97}\text{Si}_{0.02}\text{O}_{12.00})\text{F}_{0.71}(\text{OH})_{0.29}$. Стоит отметить существенную примесь (OH)[–] (расч.) –

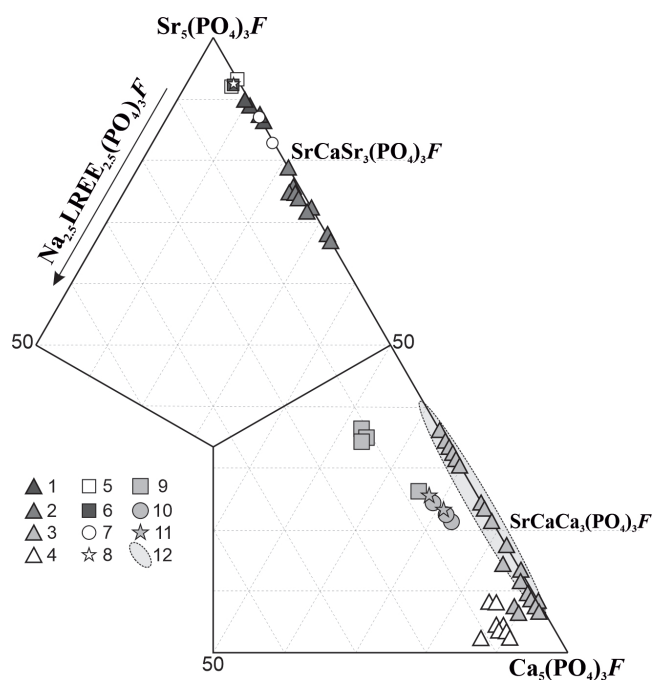


Рис. 4. Составы минералов системы фторапатит Ca₅(PO₄)₃F – стронадельфит Sr₅(PO₄)₃F – гипотетический конечный член состава Na_{2.5}LREE_{2.5}(PO₄)₃F.

1–4 – Кондерский массив: 1 – стронадельфит, 2 – фторстрофит, 3 – Sr-фторапатит, 4 – Na-PЗЭ-фторапатит; 5 – стронадельфит (г. Кукисвумчорр, Хибины) (Pekov et al., 2010); 6 – стронадельфит (г. Кукисвумчорр, Хибины) среднее значение по шести анализам (Pekov et al., 2010); 7 – стронадельфит (г. Карнасурт, Ловозеро) (Pekov et al., 2010); 8 – стронадельфит (г. Аллуайв, Ловозеро) (Chakhmouradian et al., 2002); 9 – фторкафит (Ловозеро) (Chakhmouradian et al., 2005); 10 – фторкафит (Хибины) (Chakhmouradian et al., 2005); 11 – фторкафит (Хибины) (Хомяков и др., 1997; Яковенчук и др., 1999); 12 – фторкафит (Тича) (Kropáč et al., 2017).

Fig. 4. Compositions of minerals of the system fluorapatite Ca₅(PO₄)₃F – stronadelphite Sr₅(PO₄)₃F – a hypothetical finite member of the composition Na_{2.5}LREE_{2.5}(PO₄)₃F.

1–4 – Konder pluton: 1 – stronadelphite, 2 – fluorstrophite, 3 – Sr-fluorapatite, 4 – Na-REE-fluorapatite; 5 – stronadelphite (Mt. Kukisvumchorr, Khibiny) (Pekov et al., 2010); 6 – stronadelphite (Mt. Kukisvumchorr, Khibiny), average of six analyses (Pekov et al., 2010); 7 – stronadelphite (Mt. Karnasurt, Lovozero) (Pekov et al., 2010); 8 – stronadelphite (Mt. Alluaiv, Lovozero) (Chakhmouradian et al., 2002); 9 – fluorcaphite (Lovozero) (Chakhmouradian et al., 2005); 10 – fluorcaphite (Khibiny) (Chakhmouradian et al., 2005); 11 – fluorcaphite (Khibiny) (Khomyakov et al., 1997, Yakovenchuk et al., 1999); 12 – fluorcaphite (Ticha) (Kropáč et al., 2017).

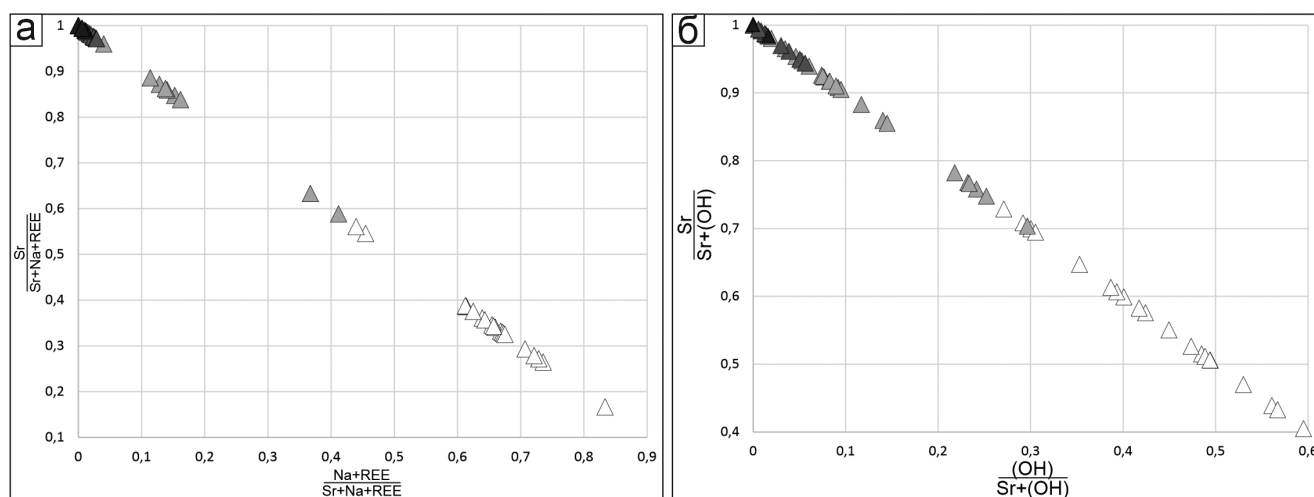


Рис. 5. Корреляция между содержаниями $\sum(\text{Na} + \text{REE})$ и Sr^{2+} (а) и $(\text{OH})^-$ и Sr^{2+} (б) в составе Sr-содержащих минералов надгруппы апатита эвдиалит-эгирин-альбитовых пород Кондерского массива.

Условные обозначения представлены на рис. 4.

Fig. 5. Correlation between $\sum(\text{Na} + \text{REE})$ and Sr^{2+} (a) and $(\text{OH})^-$ and Sr^{2+} (b) contents in composition of Sr-bearing minerals of the apatite supergroup of eudialyte-aegirine-albite rocks of the Kondersky pluton.

For symbols, see Fig. 4.

до 0.58 ф.к., (среднее, 0.29). В одном из полученных составов его содержание превышает содержания F, что формально позволяет диагностировать минерал как гидроксилapatит.

На тройной диаграмме составов минералов системы фторапатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – стронадельфит $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – гипотетический конечный член состава $\text{Na}_{2.5}\text{LREE}_{2.5}(\text{PO}_4)_3\text{F}$ составы стронадельфита и фторстрофита формируют отдельные поля (рис. 4). Выделяется также группа анализов Sr-фторапатита с повышенными содержаниями Sr, в то время как оставшиеся составы Sr-фторапатита и Na-PЗЭ-фторапатит формируют общее поле и уверенно разделяются только по минеральной ассоциации.

На диаграммах отношения Sr^{2+} к $\sum(\text{Na} + \text{PЗЭ})$ и Sr^{2+} к $(\text{OH})^-$ видно, что с понижением содержания Sr в составе минералов увеличиваются содержания Na и PЗЭ, а также содержание воды (в форме OH^-) (рис 5а, б). В целом химические составы Sr-доминантных стронадельфита и фторстрофита близки известным находкам данных минералов и несущественно отличаются от них по микропримесям. В то же время анализы Sr-фторапатита с близкой к фторкафиту стехиометрией сходны с образцами из региона Тича и отличаются от составов минералов из Хибинского и Ловозерского массивов существенно меньшими содержаниями Na и PЗЭ.

Заключение

Sr-содержащие минералы надгруппы апатита, обнаруженные в составе эвдиалит-эгирин-альбитовых пород Кондерского массива представлены четырьмя разновидностями, относящимися к трем минеральными видами. Две разновидности характеризуются преобладанием Sr в химическом составе (стронадельфит и фторстрофит), две другие – преобладанием Ca (Sr-фторапатит и Na-PЗЭ-фторапатит). В центральных частях зональных кристаллов Sr-фторапатита отмечены повышенные содержания Sr (>1 ф.к.), что формально дает повод отнести фазу к другому минеральному виду – фторкафиту.

Таким образом, в исследуемых породах наблюдается практически полный изоморфный ряд фторапатит – стронадельфит, отвечающий изоморфной схеме $\text{Ca}^{2+} \longleftrightarrow \text{Sr}^{2+}$. Отсутствие промежуточных составов с отношением Ca/Sr, близким к 1, может указывать на перерыв в процессе формирования Sr-фосфатов. В меньшей степени для минералов характерны изоморфные схемы $\text{Ca}^{2+} \longleftrightarrow \text{Ba}^{2+}$, $2\text{Ca}^{2+} \longleftrightarrow \text{Na}^+ + \text{REE}^{3+}$ и $\text{F}^- \longleftrightarrow (\text{OH})^-$, степень проявления которых варьирует в зависимости от отношения Ca/Sr: по мере уменьшения содержания Sr снижается содержание Ba и увеличиваются содержания Na + PЗЭ и $(\text{OH})^-$. Так, стронадельфит практически не содержит Na, PЗЭ и $(\text{OH})^-$, в то вре-

мя как в некоторых составах фторапатита сумма $\text{Na} + \text{PЗЭ}$ превышает содержания Sr^{2+} , а количество $(\text{OH})^-$ близко к содержаниям F^- . Примесь Ва характерна только для составов с содержаниями $\text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$.

Несмотря на широкие вариации химического состава, обнаруженные Sr-содержащие фосфаты относятся к двум минеральным ассоциациям. Стронадельфит и фторстрофит встречаются вместе с минералами группы лампрофиллита, лоренцитом и титанитом. Na-PЗЭ-фторапатит образуется в корродированных зернах эвдиалита в ассоциации с кальциокатаплеитом, кайнозитом-(Y) и перклевеитом-(Ce). В то же время Sr-фторапатит отмечен в обеих ассоциациях, при этом в первом случае минерал формирует ксеноморфные индивиды, а во втором – гипидиоморфные кристаллы в массе сепиолита.

Исходя из полученных данных, можно охарактеризовать вероятную последовательность кристаллизации минералов. Наиболее богатые Sr стронадельфит и фторстрофит формируются раньше других фосфатов одновременно с баритолампрофиллитом и титанитом по лампрофиллиту. На это указывают их морфология и стабильная примесь Ва в составе. Следующим кристаллизуется Sr-фторапатит, при этом зональность его индивидов указывает на уменьшение содержаний Sr в процессе формирования минерала. Наиболее поздним является Na-PЗЭ-фторапатит. Он образуется после кальциокатаплеита, замещающего эвдиалит, но раньше, чем кайнозит-(Y), формирующийся при разрушении цирконосиликата на завершающих низкотемпературных этапах становления породы (Пеков, 1998; Osipov et al., 2018).

Предполагается (Osipov et al., 2018), что эвдиалит-эгирин-альбитовые породы Кондерского массива являются продуктом постмагматического преобразования фельдшпатоидных пегматитов. Находки обогащенных Sr минералов надгруппы апатита подтверждают данный тезис (Хомяков и др., 1997; Пеков и др., 1995, 1996, Pekov et al., 2010; Chakmouradian et al., 2002; Liferovich, Mitchell, 2006). Установленная нами последовательность формирования фосфатов (стронадельфит → фторстрофит → Sr-фторапатит → Na-PЗЭ-фторапатит) отражает тенденцию к уменьшению содержаний Sr в процессе кристаллизации. В работе (Liferovich, Mitchell, 2006), посвященной минералам группы апатита из нефелиновых сиенитов щелочного комплекса Пилансберг (Южная Африка), показано, что наиболее богатые Sr фазы формируются на

стадии, когда среда минералообразования максимально щелочная, в то время как обогащение Na и PЗЭ происходит на стадии понижения щелочности. Можно предположить, что процесс кристаллизации минералов группы апатита в эвдиалит-эгирин-альбитовых породах Кондерского массива отвечает тенденции к уменьшению щелочности минералообразующей среды.

Ранее было установлено (Петров и др., 2016; Гуревич и др., 2020), что заключительным событием в процессе формирования Cu-Pt-Pd оруденения в косьвитах Кондерского массива стало внедрение щелочных пород. Оно повлекло за собой активное перераспределение металлов и движение обогащенных Na, Ca, Ba, La и Sr щелочных растворов, обеспечивших метасоматическое преобразование пород. В этой связи, полученные в работе данные могут быть актуальны для выделения критериев отличия обогащенных Sr апатита щелочной ассоциации от апатита, встречающегося в неизмененных косьвитах, что может быть использовано при поиске и оконтуривании тел рудоносных метасоматитов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры минералогии СПбГУ, в частности, проф. А.И. Брусницыну, сотрудникам РЦ СПбГУ «Геомодель» В.В. Шиловских и Н.С. Власенко за проведение аналитических работ и рецензентам за ценные рекомендации и комментарии к данной работе. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-35-90067. Исследования выполнены с использованием аналитических возможностей ресурсных центров Санкт-Петербургского Государственного Университета «Геомодель», «Микроскопии и микроанализа», «Рентгенодифракционные методы исследования».

Литература

Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. (2014) Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб, СПбГУ, 133 с.

Гуревич Д.В., Белогуб Е.В., Петров С.В., Полонянкин А.А., Заботина М.В. (2020) Модель формирования Cu-Pt-Pd оруденения в платиноносном массиве Урало-Аляскинского типа: массив Кондер, Хабаровский Край, Россия. *Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований. Труды к 90-летию ИГЕМ РАН*. М., ИГЕМ РАН, 87–90.

Гуревич Д.В., Полонянкин А.А. (2016) Сульфидные полиминеральные руды массива Кондер, Хабаровский край: геологическая позиция. Проблемы геологии

и эксплуатации месторождений платиновых металлов. СПб, СПбГУ, 27–46.

Гурович В.Г., Емельяненко Е.П., Землянухин В.Н., Каретников А.С., Квасов А.И., Лазаренков В.Г., Малич К.Н., Мочалов А.Г., Приходько В.С., Степашко А.А. (1994) Геология, петрология и рудоносность Кондерского массива. М., Наука, 176 с.

Ефимов А.Ф., Кравченко С.М., Васильева З.В. (1962) Стронций-апатит – новый минерал. *Доклады Академии наук СССР*, **142**, 439–442.

Каретников А.С. (2006) Возраст и генезис платиноидной минерализации массива Кондер: палеомагнитные и радиоизотопные данные. *Литосфера*, **3**, 96–107.

Клевцова Р.Ф. (1964) О кристаллической структуре стронций-апатита. *Журнал структурной химии*, **5**(2), 318–320.

Лазаренков В.Г., Малич К.Н., Сахьянов Л.О. (1992) Платинометальная минерализация зональных ультраосновных и коматиитовых массивов. Л., Недра, 217 с.

Малич К.Н. (1999) Платиноиды клинопироксенит-дунитовых массивов Восточной Сибири (геохимия, минералогия, генезис). СПб, ВСЕГЕИ, 296 с.

Мочалов А.Г. (2019) Замечательные минералы платины массива Кондер (Хабаровский край). *Минералогический альманах*, **23**(3), 128 с.

Некрасов И.Я., Ленников А.М., Октябрьский Р.А. и др. (1994) Петрология и платиноносность кольцевых щелочно-ультраосновных комплексов. М., Наука, 381 с.

Орлова М.П. (1991) Геологическое строение и генезис Кондерского ультрамафитового массива. *Тихоокеанская геология*, **1**, 80–88.

Осипов А.С., Антонов А.А. (2021) Гальгенбергит-(Ce) из щелочных пород Кондерского массива (Хабаровский край). *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, **18**, 326–331.

Осипов А.С., Антонов А.А., Бочаров В.Н., Власенко Н.С. (2021) Стронадельфит из щелочных пород Кондерского массива (Хабаровский край). *Записки РМО*, **150**(3), 67–78.

Пекон И.В. (1998) Иттриевая минерализация в Хибинско-Ловозерском щелочном комплексе (Кольский полуостров). *Записки ВМО*, **127**(5), 66–85.

Пекон И.В., Куликова И.М., Кабалов Ю.К., Елецкая О.В., Чуканов Н.В., Меньшиков Ю.П., Хомяков А.П. (1996) Беловит-(La) $\text{Sr}_3\text{Na}(\text{La},\text{Ce})[\text{PO}_4]_3(\text{F},\text{OH})$ – новый редкоземельный минерал из группы апатита. *Записки ВМО*, **125**(3), 101–109.

Пекон И.В., Чуканов Н.В., Елецкая О.В., Хомяков А.П., Меньшиков Ю.П. (1995) Беловит-(Ce): новые данные, уточненная формула и соотношение с другими минералами группы апатита. *Записки ВМО*, **124**(2), 98–100.

Петров С.В., Бороздин А.П., Полеховский Ю.С., Тарасова И.П. (2016) Последовательность минерало-

образования в сульфидно-платинометальных рудах в косьвитах Кондерского массива. *Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов*. СПб, СПбГУ, 16–21.

Пилюгин А.Г., Бугаев И.А. (2016) Общие вопросы геологии медно-платиново-палладиевого оруденения массива Кондер, Дальний Восток России. *Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов*. СПб, СПбГУ, 22–26.

Пушаровский Д.Ю., Надежина Т.Н., Хомяков А.П. (1987) Кристаллическая структура стронций-апатита из Хибин. *Кристаллография*, **2**, 891–895.

Хомяков А.П., Куликова И.М., Расцветаева Р.К. (1997) Фторкафит $\text{Ca}(\text{Sr},\text{Na},\text{Ca})(\text{Ca},\text{Sr},\text{Ce})_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – новый минерал со структурным мотивом апатита. *Записки РМО*, **126**(3), 87–97.

Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Меньшиков Ю.П. (1999) Минералы Хибинского массива. М., Земля, 326 с.

Chakmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. (2002) Strontium-apatite: new occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals. *The Canadian Mineralogist*, **40**, 121–136.

Chakmouradian A.R., Huges J.M., Rakovan J. (2005) Fluorocaphite, a second occurrence and detailed structural analysis: simultaneous accommodation of Ca, Sr, Na, and LREE in the apatite atomic arrangement. *The Canadian Mineralogist*, **43**, 735–746.

Kropáč K., Dolníček Z., Uher P., Urubek T. (2017) Fluorocaphite from hydrothermally altered teschenite at Tichá, Outer Western Carpathians, Czech Republic: compositional variations and origin. *Mineralogical Magazine*, **81**(6), 1485–1501.

Liferovich R.P., Mitchell R.H. (2006) Apatite-group minerals from nepheline syenite, Pilansberg alkaline complex, South Africa. *Mineralogical Magazine*, **70**(5), 463–484.

Osipov A.S., Antonov A.A., Panikorovskii T.L., Zolotarev A.A. (2018) Hydrated CO_3 -bearing analog of manganoeudialyte from alkali pegmatites of the Konder pluton, Khabarovsk krai. *Geology of Ore Deposits*, **60**(8), 1–10.

Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C., Pekov I.V., Rakovan J., White T.J. (2010) Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *European Journal of Mineralogy*, **22**, 63–179.

Pekov I.V., Britvin S.N., Zubkova N.V., Pushcharovsky D.Yu., Pasero M., Merlino S. (2010) Stronadelphite, $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$, a new apatite-group mineral. *European Journal of Mineralogy*, **22**, 869–874.

Pushcharovsky D.Yu., Nadezhina T.N., Khomyakov A.P. (1987) [Crystal structure of strontium-apatite from Khibina]. *Kristallografiya [Crystallography]*, **32**, 891–895. (in Russian).

References

- Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G.** (2014) [Structures, isomorphism, formulas, classification of minerals]. St. Petersburg, SPbGU, 133 p. (in Russian).
- Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H.** (2002) Strontium–apatite: new occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals. *The Canadian Mineralogist*, **40**, 121–136.
- Chakhmouradian A.R., Huges J.M., Rakovan J.** (2005) Fluorcapthite, a second occurrence and detailed structural analysis: simultaneous accommodation of Ca, Sr, Na, and LREE in the apatite atomic arrangement. *The Canadian Mineralogist*, **43**, 735–746.
- Efimov A.F., Kravchenko S.M., Vasil'eva Z.V.** (1962) [Strontium-apatite – a new mineral]. *Doklady Akademii nauk SSSR [Doklady of Academy of Sciences of the USSR]*, **142**, 439–442 (in Russian)
- Gurevich D.V., Belogub E.V., Petrov S.V., Polonianskin A.A., Zabolotina M.V.** (2020) [Formation model of Cu-Pt-Pd mineralization in the Uralian-Alaskan-type Konder Pt-bearing pluton, Khabarovsk krai, Russia]. *Porodo-, mineralo- i rudoobrazovanie: dostizheniya i perspektivy issledovaniy. Trudy k 90-letiyu IGER RAN [Rock, mineral and ore formation: achievements and prospects of research. Proceedings for the 90th anniversary of the IGER RAS]*. Moscow, IGER RAN, 87–90. (in Russian)
- Gurevich D.V., Polonyankin A.A.** (2016) [Sulfide polymetallic ores of the Konder pluton, Khabarovsk krai: geological setting]. In: *Problemy geologii i ekspluatatsii mestorozhdenii platinovykh metallov [Problems of Geology and Exploitation of Platinum Metal Deposits]*. St. Petersburg, SPbGU, 27–46. (in Russian)
- Gurevich V.G., Emel'yanenko E.P., Zemlyanukhin V.N., Karetnikov A.S., Kvasov A.I., Lazarenkov V.G., Malich K.N., Mochalov A.G., Prihodko V.S., Stepashko A.A.** (1994) [Geology, petrology and ore mineral resources of the Konder pluton]. Moscow, Nauka, 176 p. (in Russian).
- Karetnikov A.S.** [Age and genesis of platinoid mineralization of the Konder pluton: paleomagnetic and radioisotope data]. *Litosfera [Litosphere]*, **3**, 96–107. (in Russian).
- Khomyakov A.P., Kulikova I.M., Rastsvetaeva R.K.** (1997) [Fluorcapthite $\text{Ca}(\text{Sr}, \text{Na}, \text{Ca})(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ce})_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – a new mineral with an apatite-like structural motif]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **126**(3), 87–97 (in Russian).
- Klevtsova R.F.** (1964) [Crystal structure of strontium-apatite]. *Zhurnal strukturnoi khimii [Journal of Structural Chemistry]*, **5**(2), 318–320. (in Russian)
- Kropáč K., Dolníček Z., Uher P., Urubek T.** (2017) Fluorcapthite from hydrothermally altered teschenite at Tichá, Outer Western Carpathians, Czech Republic: compositional variations and origin. *Mineralogical Magazine*, **81**(6), 1485–1501.
- Lazarenkov V.G., Malich K.N., Sakh'yanov L.O.** (1992) [Platinum ore mineralization of zonal ultramafic and komatiite plutons]. Leningrad, Nedra, 217 p. (in Russian).
- Liferovich R.P., Mitchell R.H.** (2006) Apatite-group minerals from nepheline syenite, Pilansberg alkaline complex, South Africa. *Mineralogical Magazine*, **70**(5), 463–484.
- Malich K.N.** (1999) [Platinoids of the clinopyroxenite–dunite massifs of Eastern Siberia: geochemistry, mineralogy, genesis]. St. Petersburg, VSEGEI, 296 p. (in Russian).
- Mochalov A.G.** (2019) [Remarkable Pt minerals of the Konder pluton (Khabarovsk krai, Russia)]. *Mineralogicheskii almanakh [Mineralogical Almanac]*, **23**(3), 128 p. (in Russian).
- Nekrasov I.Ya., Lennikov A.M., Oktyabrsky R.A.** (1994) [Petrology and Pt-bearing potential of the ring alkaline ultramafic complexes]. Moscow, Nauka, 381 p. (in Russian).
- Orlova M.P.** (1991) [Geological structure and genesis of the Konder ultramafic pluton]. *Tikhookeanskaya geologiya [Pacific Geology]*, **1**, 80–88 (in Russian).
- Osipov A.S., Antonov A.A.** (2021) [Galgenbergite-(Ce) from the alkaline rocks of the Konder pluton, Khabarovsk krai]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN [Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute KSC RAS]*, **18**, 326–331 (in Russian).
- Osipov A.S., Antonov A.A., Bocharov V.N., Vlasenko N.S.** (2021) [Stronadelphite from the alkaline rocks of the Konder pluton (Khabarovsk krai)]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **150**(3), 67–78. (in Russian).
- Osipov A.S., Antonov A.A., Panikorovskii T.L., Zolotarev-jr A.A.** (2018) Hydrated CO_3 -bearing analog of manganoeudalyte from alkali pegmatites of the Konder pluton, Khabarovsk krai. *Geology of Ore Deposits*, **60**(8), 1–10.
- Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C., Pekov I.V., Rakovan J., White T.J.** (2010) Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *European Journal of Mineralogy*, **22**, 63–179.
- Pekov I.V.** (1998) [Y mineralization in the Khibiny–Lovozero alkaline complex, Kola Peninsula]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **127**(5), 66–85 (in Russian).
- Pekov I.V., Chukanov N.V., Eletskaia O.V., Khomyakov A.P., Menshikov Yu.P.** (1995) [Belovite-(Ce): new data, refined formula and relationships with other minerals of the apatite group]. *Zapiski VMO [Proceedings of the All-Russian Mineralogical Society]*, **124**(2), 98–110 (in Russian).
- Pekov I.V., Kulikova I.M., Kabalov Yu.K., Eletskaia O.V., Chukanov N.V., Menshikov Yu.P., Khomyakov A.P.** (1996) [Belovite-(La), $\text{Sr}_3\text{Na}(\text{La}, \text{Ce})[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{OH})$ – a new rare earth mineral of the apatite group]. *Zapiski VMO*

[*Proceedings of the Russian Mineralogical Society*], **125**(3), 101–109 (in Russian).

Pekov I.V., Britvin S.N., Zubkova N.V., Pushcharovsky D.Yu., Pasero M., Merlino S. (2010) Stronadelphite, $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, a new apatite-group mineral. *European Journal of Mineralogy*, **22**, 869–874.

Petrov S.V., Borozdin A.P., Polekhovsky Yu.S., Tarasova I.P. (2016) [Sequence of mineral formation in sulfide-platinum-metal ores in kosvites of the Konder pluton]. *Problemy geologii i ekspluatatsii mestorozhdenii platinovykh metallov* [Problems of Geology and Exploitation of Platinum Metal Deposits]. St. Petersburg, SPbGU, 16–21.

Pilyugin A.G., Bugaev I.A. (2016) [General issues of geology of Cu-Pt-Pd mineralization of the Konder pluton, Far East of Russia]. *Problemy geologii i ekspluatatsii mestorozhdenii platinovykh metallov* [Problems of Geology and Exploitation of Platinum Metal Deposits]. St. Petersburg, SPbGU, 22–26.

Pushcharovsky D.Yu., Nadezhina T.N., Khomyakov A.P. (1987) [Crystal structure of strontium-apatite from Khibiny]. *Kristallografiya* [Crystallography], **32**, 891–895 (in Russian)

Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Yu., Pakhomovsky Ya.A., Men'shikov Y.P. (1999) [Minerals of the Khibiny pluton]. Moscow, Zemlya, 326 p. (in Russian).