

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

СТРОНАДЕЛЬФИТ ИЗ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД КОНДЁРСКОГО МАССИВА
(ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)© 2021 г. А. С. Осипов¹, *, А. А. Антонов², **, В. Н. Бочаров¹, ***, Н. С. Власенко¹, ****¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199164 Россия²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского,
Средний просп., 74, Санкт-Петербург, 199106 Россия

*e-mail: osipov.anst@yandex.ru

**e-mail: anthonov@yandex.ru.

***e-mail: w.bocharow@spbu.ru.

****e-mail: ly17@mail.ru

Поступила в редакцию 20.02.2021 г.

После доработки 16.03.2021 г.

Принята к публикации 14.04.2021 г.

В работе представлена характеристика стронадельфита $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, обнаруженного в эвдиалит-эгирин-альбитовых породах Кондёрского щелочно-ультраосновного массива (Хабаровский край). Минерал формирует индивиды размером до 400×150 мкм, ассоциирующие с эвдиалитом, лампрофиллитом, баритолампрофиллитом, микроклином, титанитом, нефелином, обогащенным стронцием фторапатитом и другими аксессуарными минералами. Кристаллы стронадельфита бесцветные, полупрозрачные. Химическая формула в пересчете на 25 единиц заряда имеет вид: $(\text{Sr}_{4.21}\text{Ca}_{0.61}\text{Ba}_{0.07}\text{Na}_{0.07}\text{Fe}_{0.05})_{5.01}(\text{P}_{3.01}\text{O}_{11.93})\text{F}_{1.14}$. Минерал близок по химическому составу стронадельфиту из щелочных пород Кольского полуострова. Рамановский спектр исследуемого стронадельфита в целом совпадает со спектром синтетического аналога. Диагностика минерала подтверждена методом дифракции обратно-рассеянных электронов. Сделано предположение о кристаллизации минерала в процессе низкотемпературного гидротермального преобразования щелочных пород.

Ключевые слова: стронадельфит, высокостронциевый фторапатит, щелочные породы, Кондёрский массив, щелочно-ультраосновные комплексы

DOI: 10.31857/S0869605521030072

ВВЕДЕНИЕ

Стронций является распространенной примесью в составе фосфатов надгруппы апатита. Обычно данный элемент присутствует в небольших концентрациях, однако в щелочных комплексах апатитоподобные минералы нередко содержат стронций в качестве видообразующего компонента (Pasero et al., 2010). Одним из таких минералов является стронциевый аналог фторапатита – стронадельфит $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$.

Впервые минерал с близким к стронадельфиту химическим составом был обнаружен С.Н. Бритвиным в породах Ловозерского щелочного массива на г. Карнасурт (Пекков, 2000). Позже аналогичный фосфат, названный “стронциевым апатитом”, был диагностирован в том же массиве на г. Аллуайв (Chakhtmouradian et al., 2002). Наконец, в 2010 г. на материале из Хибинского щелочного массива (г. Кукисвумчорр) этот фосфат был детально изучен, и Комиссия по новым минералам, номенклатуре и клас-

сификации ММА утвердила его как новый минеральный вид под названием стронадельфит (Rekov et al., 2010). В Хибинах стронадельфит был установлен в качестве акцессорного минерала в высокощелочной пегматитовой жиле, секущей нефелиновый сиенит. Главными минералами этой жилы являются калиевый полевой шпат, нефелин, пироксен эгирин-диопсидового ряда, эвдиалит и лампрофиллит. Стронадельфит встречается в натролитовых гнездах в ассоциации с пектолитом, беловитом-(Ce), беловитом-(La), гейдоннеитом, ненадкевичитом, комаровитом и другими акцессорными минералами.

Позднее стронадельфит отмечался в другом месте Хибинского массива — в натролитсодержащем уртите на г. Китчепахк (Yakovenchuk et al., 2010), а также в Японии — в ассоциации с жадеитом из региона Итоигава (Miyajima, 2014) и Бразилии — в щелочных породах комплекса Посус-ди-Калдас, штат Минас-Жейрас (Azzi et al., 2018). Однако каких-либо характеристик стронадельфита из данных объектов в перечисленных публикациях не приводится.

Нами стронадельфит обнаружен в щелочных породах Кондёрского массива (Хабаровский край). Это седьмая находка данного минерала в природе и четвертая на территории России, причем первая за пределами Кольской щелочной провинции. Настоящая статья посвящена минералогической характеристике кондёрского стронадельфита.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Кондёрский щелочно-ультраосновный массив находится в 800 км к северу от Хабаровска в междуречье р. Омня и р. Маймакан — левых притоков 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. Кондёр, которая продолжается до настоящего времени. За этот период было подготовлено большое количество публикаций, посвященных геологическому строению (Гурович и др., 1994; Петрология..., 1994), генезису (Орлова, 1991) и платиноидам (Лазаренков и др., 1992; Малич, 1999; Мочалов, 2019) Кондёрского массива. Однако щелочным породам массива, особенно их минералогии, уделялось значительно меньшее внимание (Гурович и др., 1994; Петрология..., 1994)

Кондёрский 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. Вмещающие породы (рис. 1) представлены нижнеархейскими скарнированными мраморами, кристаллическими сланцами и кварцитами, а также среднерифейскими терригенными породами (аргиллитами, алевролитами и песчаниками).

Интрузивные образования Кондёрского комплекса представлены двумя группами пород различного состава и возраста. Большую часть площади массива слагают 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 косьвиты, представленные крупными дуговыми телами на периферии клинопироксенитового кольца и многочисленными разноориентированными дайками в дунитах и клинопироксенитах. Менее распространены в пределах массива 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; Петрология..., 1994) среди щелочных пород установлены сиениты (и их пегматиты), фельдшпатоидные сиениты (и их пегматиты), а также щелочные граниты. Нами отобраны и изучены пегматиты нефелин-сиенито-

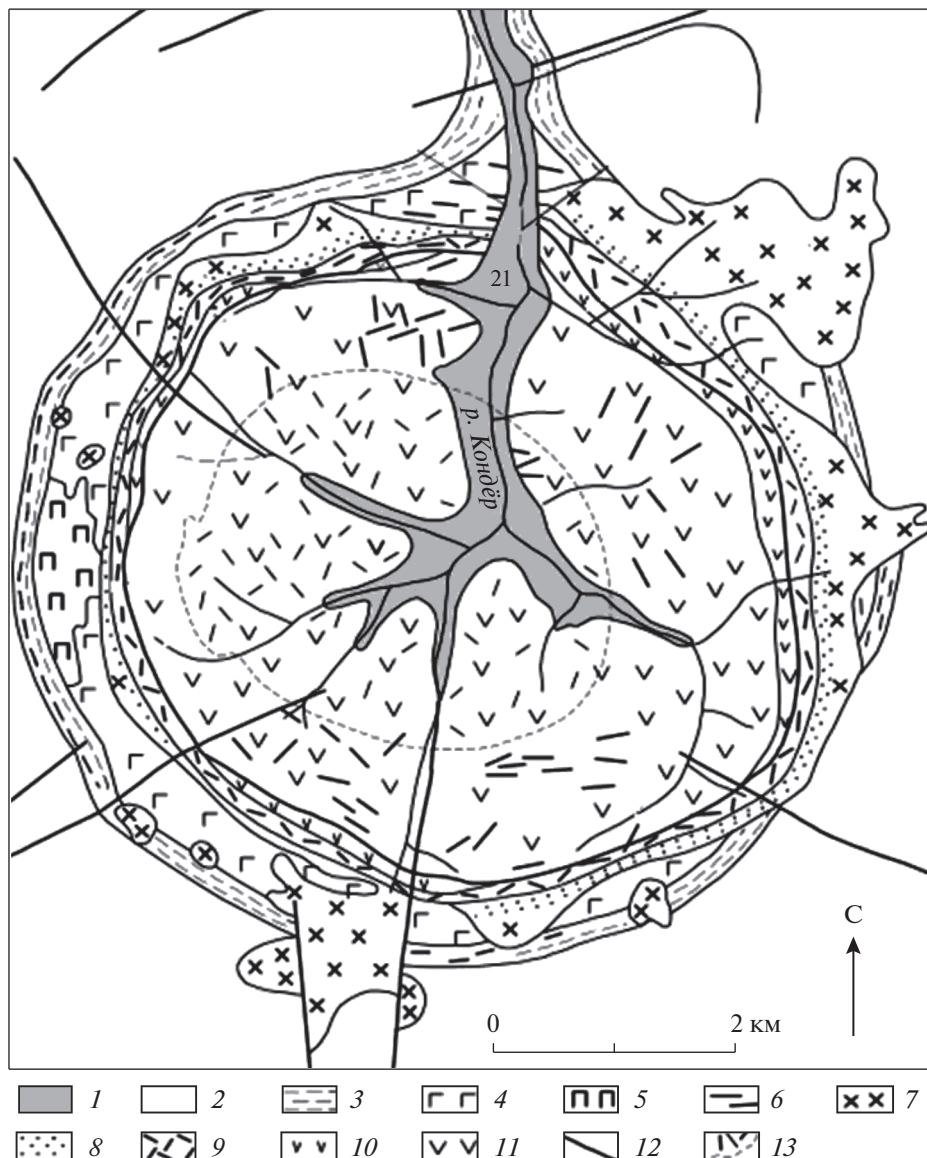


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кондёрского массива (составили: Г.В. Андреев, А.А. Ельянов, А.Н. Мильто). 1 – рыхлые четвертичные отложения; 2, 3 – песчаники, алевриты и аргиллиты ороговикованные; 4 – высокоглиноземистые и гиперстенсодержащие гнейсы, кварциты, мраморы; 5 – позднеархейские пегматоидные граниты; 6 – щелочные пегматиты, 7 – диориты, диорит–сиениты, 8 – меланократовые габброиды, 9 – косвиты, 10 – пироксениты, 11 – дуниты; 12 – разрывные нарушения; 13 – поле интенсивного развития в дунитах жильных и дайковых тел косвитов в центре массива.

Fig. 1. Schematic geological map of the Kondër massif (by G.V. Andreev, A.A. Elyanov, A.N. Milto). 1 – unconsolidated Quaternary sediments; 2, 3 – sandstones, siltstones and mudstones hornstoned; 4 – hypersthene-containing and high-alumina gneisses, quartzites, marbles; 5 – late Archean pegmatoid granites; 6 – alkaline pegmatites, 7 – diorites, diorite–syenites, 8 – melanocratic gabbroids, 9 – kosvites, 10 – pyroxenites, 11 – dunites; 12 – faults; 13 – field of intense development of kosvites in the dunite veins and dike bodies in the center of the massif.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и коэффициенты в эмпирической формуле стронадельфита
Table 1. Chemical composition (wt %) and formula coefficients of stronadelphite

Компонент	Теор. состав	Массив										
		Кондёрский ¹					Хибинский (г. Кукисвумчорр) ²			Ловозерский		
		<i>n</i> = 4					<i>n</i> = 6			<i>n</i> = 2		<i>n</i> = 1
		1	2	3	4	\bar{X}	\bar{X}	Min	Max	Min	Max	
P ₂ O ₅	28.69	30.43	30.34	27.52	31.14	29.86	29.02	28.70	29.60	28.10	29.50	27.86
SiO ₂												0.39
ThO ₂							0.28	0.20	0.60			
La ₂ O ₃							0.34	0.20	0.40			0.74
Ce ₂ O ₃							0.22		0.30			0.71
Nd ₂ O ₃												0.23
SrO	69.83	61.20	60.43	59.54	62.38	60.89	62.72	62.40	62.90	61.30	63.90	62.86
CaO		5.33	5.62	3.80	4.22	4.74	2.49	2.40	2.60	4.80	7.20	2.59
BaO		0.79	1.15	2.38	1.32	1.41	2.40	1.90	2.60	0.50	1.60	
FeO		0.43	0.52			0.48						
PbO										0.00	0.40	
Na ₂ O				0.36	0.22	0.29	0.10	0.06	0.12			0.21
F	2.56	3.33	3.51	2.96	2.33	3.03	1.45	1.30	1.50		3.32	2.42
H ₂ O (расч.)					0.18		0.54					0.05
-O=F ₂	-1.08	-1.40	-1.48	-1.25	-0.98	-1.28	-0.61				-1.40	-1.02
Total	100.00	100.11	100.09	95.32	100.82	99.04	98.95			100.00	100.80	97.04
Коэффициенты в кристаллохимической формуле, рассчитанные на 25 зарядов												
P	3.00	3.03	3.02	2.97	3.07	3.01	3.01			2.87	2.93	2.95
Si												0.05
Th							0.01					
La							0.02					0.03
Ce							0.01					0.03
Nd												0.01
Sr	5.00	4.17	4.13	4.40	4.21	4.21	4.46			4.26	4.38	4.55
Ca		0.67	0.71	0.52	0.53	0.61	0.33			0.63	0.89	0.35
Ba		0.04	0.05	0.12	0.06	0.07	0.12			0.02	0.07	
Fe		0.04	0.05			0.05						
Pb										0.00	0.01	
Na				0.09	0.05	0.07	0.02					0.05
F	1.00	1.24	1.31	1.19	0.86	1.14	0.56			1.21	1.29	0.96
OH					0.14		0.44					0.04
O	12.00	11.88	11.85	11.90	12.00	11.93	12.00			11.71	11.79	12.00

Примечания к таблице: ¹ – наши данные (1, 2, 3, 4 – исходные анализы), ^{2,3} – данные Pekov et al, 2010; ⁴ – данные Shakhmouradian et al., 2002; пустые ячейки – содержания элемента ниже порога обнаружения; *n* – число анализов для каждого источника; \bar{X} , Min, Max – среднее, минимальное и максимальное содержание для группы анализов; для анализов стронадельфита из Ловозерского³ массива использован авторский пересчет на 13 анионов O₁₂(F,OH) (Pekov et al., 2010).

вого, сиенитового и ийолит-уртитового состава, а также вишневитовые и эвдиалит-эгирин-альбитовые породы (Осипов и др., 2017). В последних был диагностирован стронадельфит.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для исследования были отобраны в 2013 г. в северной эндоконтактовой части Кондёрского 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 ресурсного центра СПбГУ “Геомодель”. Изучение морфологии, химического состава и дифракции обратного рассеяния электронов (EBSD) проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с приставкой Oxford Instruments X-Max 20 и детектором Oxford Instruments Nordlys-НКLEBSD. Условия ЭДС-анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 1.7 нА, рабочее расстояние 10 мм. Аналитики – Н.С. Власенко и В.В. Шиловских. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 1.5 нА, режим сфокусированного пучка с наклоном ступени 70°. Аналитическое программное обеспечение для сопоставления картин EBSP – 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. Рамановская (КР) спектроскопия проводилась с использованием спектрометра Horiba LabRam HR 800, оснащенного Ag⁺ лазером 514 нм мощностью 20 мВт и микроскопом Olympus BX-41 с объективами 10× и 50×, градуировка по кремниевому эталону. Аналитик – В.Н. Бочаров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Минеральная ассоциация. Основной объем эвдиалит-эгирин-альбитовых пород составляют два главных минерала – эгирин и альбит, формирующие плотную мелкокристаллическую матрицу, в которой наблюдаются второстепенные эвдиалит, лампрофиллит, баритолампрофиллит и микроклин. Эгирин представлен тонкими иголками длиной до 3–5 мм травяно-зеленого цвета, часто формирующими спутанно-волоконистые округлые или веретеновидные агрегаты размером до 1 см. Свободное пространство между ними выполнено мелкими (2–4 мм) серовато-белыми сахаровидными кристаллами альбита. Золотисто-бурые кристаллы лампрофиллита с вростками (до 500 мкм) баритолампрофиллита и белые агрегаты микроклина достигают 2 см. На общем фоне резко выделяется гидратированный карбонатсодержащий аналог манганозэвдиалита, формирующий крупные (0.5–5 см) зональные субидiomорфные кристаллы и их сегрегации (рис. 2, *а*). Зональность индивидов эвдиалита обусловлена процессами низкотемпературной гидротермальной переработки, в ходе которых происходило изменение химического состава и частичное разрушение минерала (Осипов и др., 2017).

В эвдиалит-эгирин-альбитовых породах диагностирован 21 аксессуарный минерал. Часть минералов не имеет ясно выраженной закономерности в распределении. К ним относятся реликтовые зерна нефелина до 2–3 мм (рис. 2, *б*) с прорастаниями анацита и мусковита, а также датолит, фторопатит, пирофанит, монацит-(Ce), монацит-(Nd) и ксенотим-(Y). Размеры зерен последних минералов не превышают 300 мкм.

Большинство аксессуарных минералов пространственно связаны с индивидами эвдиалита (рис. 2, *в*). Так, кальциокатаплетит формирует частые псевдоморфозы по эвдиалиту. В то же время, эльпидит, стилуэллит-(Ce), кайнозит-(Y) и перклевеит-(Ce) выполняют мелкие (50–250 мкм) пустоты в эвдиалите и скорее всего являются продуктами химического разложения этого минерала (Осипов и др., 2017). Вблизи кристаллов эвдиалита установлены ксеноморфные выделения сепиолита и нчванингита размером до 700–800 мкм, а также высокостронциевый фторопатит (фторкафит?), кальцит и гальгенбергит-(Ce). Карбонаты выполняют микротрещины и формируют каймы вокруг зерен альбита.

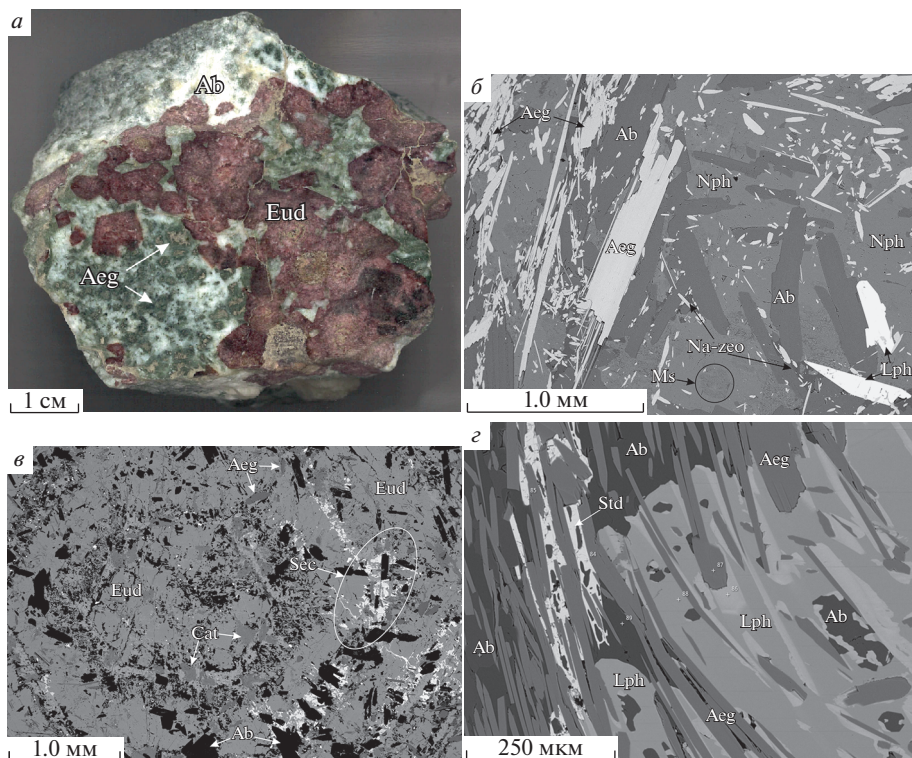


Рис. 2. Содержащие стронадельфит эвдиалит-эгирин-альбитовые породы Кондёрского массива.

Фотографии: *a* – образца, *б–г* – шлифов в обратно-отраженных электронах.

a – общий вид породы, участок с сегрегацией индивидов эвдиалита (Eud) в массе эгирина (Aeg) и альбита (Ab); *б* – взаимоотношения между эгирином (Aeg), альбитом (Ab), лампрофиллитом (Lph), нефелином (Nph) и развивающимися по нему анальцимом (Na-zeo) и мусковитом (Ms); *в* – центральная часть зерна эвдиалита (Eud) с проявленной концентрической зональностью, обусловленной включениями альбита (Ab), эгирина (Aeg), вторичных акцессорных минералов (Sec) (кайнозита-(Y), стилвеллита-(Ce)), а также замещением его кальциокатаплеитом (Cat); *г* – ксеноморфный кристалл стронадельфита (Std), выполняющий пространство между зёрнами эгирина (Aeg), альбита (Ab) и лампрофиллита (Lph).

Fig. 2. Stonadelfite-containing eudialyte-aegirine-albite rocks of the Kondor massif.

Pictures of: *a* – rock sample, *б–г* – polished sections in back-scattered electrons.

a – general view of the rock, the site with segregation of eudialyte individuals; *б* – relationships between aegirine (Aeg), albite (Ab), lamprophyllite (Lph) and nepheline (Nph) partially altered to analcime (Na-zeo) and muscovite (Ms); *в* – eudialyte grain central part with concentric zoning caused by the inclusions of albite (Ab), aegirine (Aeg), secondary accessory minerals (Sec) (kainosite-(Y), stillwellite-(Ce)) and calciocatapleite (Cat); *г* – a xenomorphic stonadelfite (Std) crystal that fills the space between grains of aegirine (Aeg), albite (Ab), and lamprophyllite (Lph).

Другие акцессорные минералы устойчиво ассоциируют с лампрофиллитом. Это титанит и стронадельфит.

Морфология и окраска. Зерна стронадельфита встречаются рядом с кристаллами лампрофиллита в эгирин-альбитовой массе. Стронадельфит (рис. 2, *г*) выполняет пространство между иголками эгирина и зёрнами альбита, формируя ксеноморфные кристаллы, вытянутые согласно удлинению игольчатых выделений эгирина. Размеры ин-

дивидов стронадельфита — до 400 мкм по удлинению и 150 мкм по ширине. Минерал полупрозрачен, бесцветен.

Химический состав. Химический состав стронадельфита достаточно постоянен (табл. 1). Содержания главных элементов варьируют в следующих пределах (мас. %): SrO 59.54–62.38 (в среднем 60.89), P₂O₅ 27.52–31.14 (в среднем 29.86), F 2.33–3.51 (в среднем 3.03). Главным примесным элементом является кальций, в меньших количествах присутствуют барий, железо и натрий (мас. %): CaO 3.80–5.62 (в среднем 4.74), BaO 0.79–2.38 (в среднем 1.41), FeO 0–0.52 (в среднем 0.48), Na₂O 0–0.36 (в среднем 0.29). Рассчитанная по средним содержаниям элементов на 25 зарядов эмпирическая формула минерала имеет вид: (Sr_{4.21}Ca_{0.61}Ba_{0.07}Na_{0.07}Fe_{0.05})_{5.01}(P_{3.01}O_{11.93})F_{1.14}. Полученные данные в целом хорошо согласуются со стехиометрией стронадельфита, за исключением несколько более высоких, относительно теоретического состава, содержаний фтора. Вероятнее всего, это обусловлено погрешностью химического анализа. Подобная ситуация ранее отмечалась в составе стронадельфита с г. Карнасурт (Пеков, 2000).

По химическому составу стронадельфит Кондёрского массива мало отличается от материала предыдущих находок данного минерала. На тройной диаграмме системы фторапатит Ca₅(PO₄)₃F – стронадельфит Sr₅(PO₄)₃F – гипотетический конечный член состава Na_{2.5}LREE_{2.5}(PO₄)₃F (рис. 3) все известные составы стронадельфита образуют единое поле. Наиболее существенное различие заключается в отсутствии (концентрация ниже предела обнаружения) в изученных нами образцах примеси редкоземельных элементов, которые установлены в составе стронадельфита из Хибинского и Ловозерского массивов.

Интересно отметить, что помимо стронадельфита в эвдиалит-эгирин-альбитовых породах Кондёрского массива нами обнаружен еще один обогащенный стронцием минерал надгруппы апатита – высокостронциевый фторапатит, часть анализов которого по соотношению катионов отвечает фторкафиту SrCaCa₃(PO₄)₃F. Однако отсутствие данных по упорядоченности стронция и кальция в структуре этого минерала не позволяет однозначно диагностировать его как фторкафит. Другие фосфаты, содержащие промежуточные количества стронция и кальция между стронадельфитом и фторкафитом (?) нами не установлены (см. рис. 3), что может косвенно свидетельствовать об ограниченности изоморфизма между этими элементами в эвдиалит-эгирин-альбитовых породах Кондёрского массива.

Рамановская (КР) спектроскопия. Рамановский спектр (рис. 4) исследуемого образца стронадельфита был получен при длине волны лазера 514 нм и нормальных условиях среды в области 70–4000 см⁻¹ с разрешением 2 см⁻¹. Полученные спектры обрабатывались с помощью программы Origin.

Ввиду изоструктурности апатита и стронадельфита, схожести их колебательных спектров, а также малого числа опубликованных материалов по спектроскопии последнего при расшифровке полученного нами КР-спектра использовались данные по фтор- и гидроксилапатиту (Penel et al., 1997; Frezzotti et al., 2012; Xue et al., 2018). Дальнейшее отождествление полос выполнено на основании работы по спектроскопии синтезированного образца стронадельфита (Zhai et al., 2015).

Согласно факторному групповому анализу, рамановский спектр стронадельфита содержит 54 моды, из которых 15 приходятся на внутренние колебания [PO₄]³⁻ и остальные решеточные колебания (Zhai et al., 2015). Так, симметричное валентное колебание [PO₄]³⁻ группы ν₁ имеет наибольшую интенсивность и находится в пределах 960–965 см⁻¹ для апатита (Frezzotti et al., 2012) и 953 см⁻¹ для стронадельфита (Zhai et al., 2015). На полученном нами спектре ν₁ имеет две компоненты – интенсивную линию на 950 см⁻¹ и в 5 раз более слабую на 970 см⁻¹. Асимметричное валентное колебание ν₃ группы [PO₄]³⁻ имеет две полосы на 1025 и 1044 см⁻¹. Симметричные деформа-

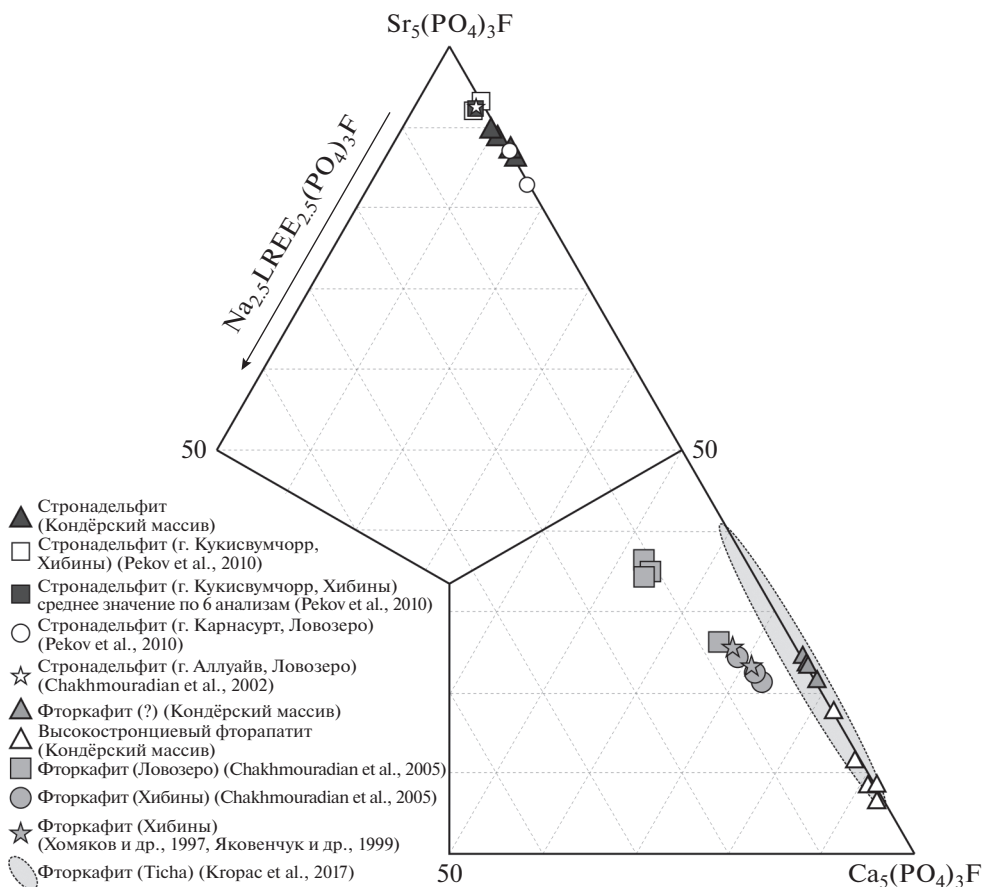


Рис. 3. Система фторапатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – стронадельфит $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – гипотетический конечный член состава $\text{Na}_{2.5}\text{LREE}_{2.5}(\text{PO}_4)_3\text{F}$.

Fig. 3. Fluorapatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – stromantite $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – hypothetical end member $\text{Na}_{2.5}\text{LREE}_{2.5}(\text{PO}_4)_3\text{F}$ system.

ционные колебания ν_2 группы $[\text{PO}_4]^{3-}$ находятся на 391, 420, 442 и 483 cm^{-1} , ассиметричные деформационные колебания ν_4 – на 545, 560, 572, 581 и 594 cm^{-1} . В то же время, для синтезированного образца (Zhai et al., 2015) колебания ν_2 отмечены на 423 и 445 cm^{-1} , ν_3 – на 1029, 1042, 1055 cm^{-1} , ν_4 – на 574, 582, 595 и 603 cm^{-1} .

Ниже 370 cm^{-1} расположены решеточные колебания при 100, 137, 188, 215, 241, 305, 346 и 369 cm^{-1} . На спектре синтетического стронадельфита выделены лишь самые интенсивные из них – 208, 242 и 305 cm^{-1} .

В КР-спектре Кондёрского стронадельфита присутствуют неидентифицированные широкие малоинтенсивные полосы с максимумами на 675, 860 и 1115 cm^{-1} . Полоса на 3552 cm^{-1} соответствует валентным ОН колебаниям. Это отвечает полученным данным по химическому составу исследуемого минерала, где в части анализов отмечен дефицит фтора, компенсируемый $(\text{OH})^-$ компонентой.

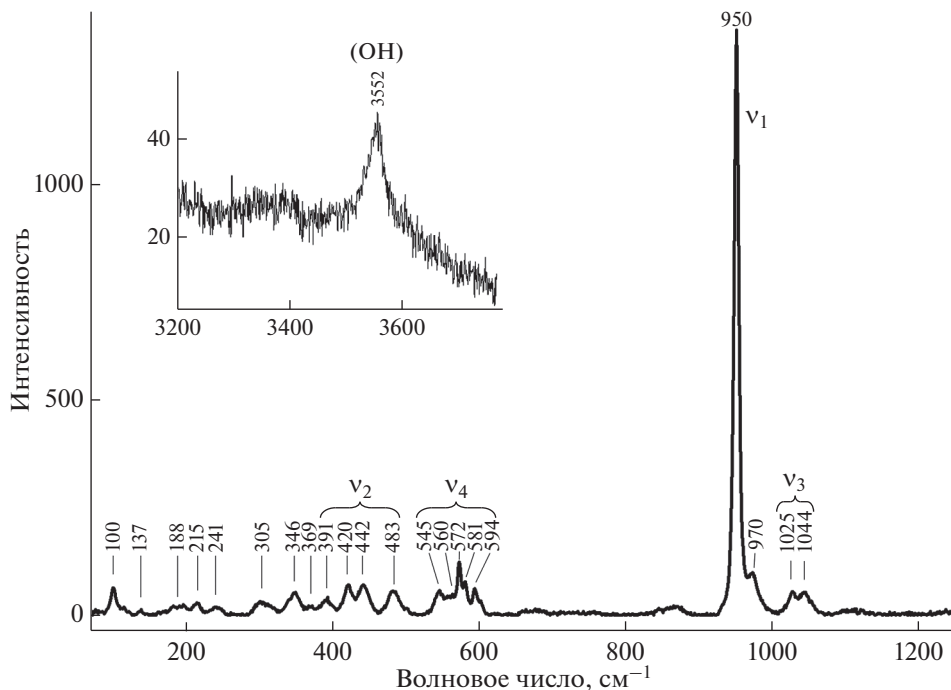


Рис. 4. Рамановский спектр стронадельфита в областях 75–1250 и 3200–3775 cm^{-1} .

Fig. 4. Stronadelphite Raman spectra in the range of 75–1250 and 3200–3775 cm^{-1} .

Дифракция обратного рассеяния электронов. Диагностика стронадельфита была дополнена дифракцией обратного рассеяния электронов (EBSD), которая применяется как локальный метод фазовой диагностики минералов. Правильность идентификации определяется величиной среднего углового отклонения (MAD) между картиной Кикучи, рассчитанной по модельной кристаллической структуре, и картиной обратного рассеяния электронов (EBSP), полученной с изучаемой фазы. Значения MAD ниже 1 град. считаются надежными для подтверждения минералов. Структурная идентификация стронадельфита проводилась путем сопоставления результатов EBSD с эталонной структурой, за основу которой были приняты параметры, приведенные в публикации (Rekov et al., 2010).

При сравнении картин Кикучи исследуемого кристалла стронадельфита с рассчитанными значениями был получен MAD 0.39° по 11 полосам совпадения (рис. 5, б), что показывает совпадение структуры исследуемого минерала с теоретически рассчитанной и подтверждает корректность диагностики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на очевидные различия в геологическом строении Кондёрского, Хибинского и Ловозерского массивов, в составе каждого из них присутствуют высокощелочные магматические породы, обогащенные редкими элементами, в частности — стронцием. Именно с такими породами связаны известные находки стронадельфита. При этом все известные образцы данного минерала близки по своей минеральной ассоциации и химическому составу. Это дает основание ожидать находки стронадельфита в

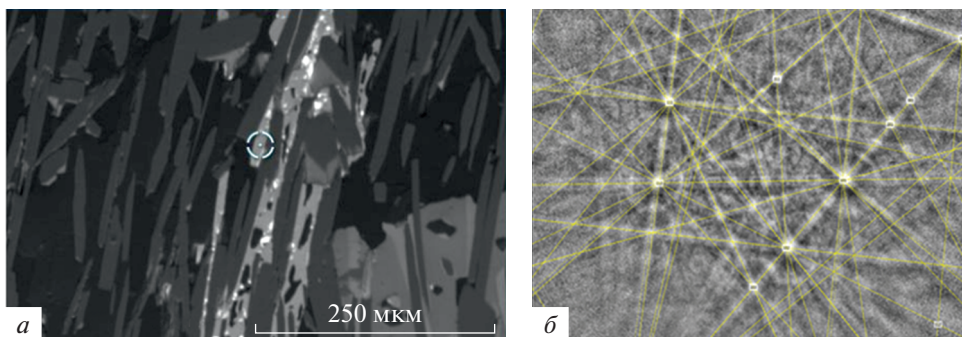


Рис. 5. *a* – точка съемки EBSD картины с кристалла стронадельфита (рис. 2, *д*). *б* – картина полос Кикучи исследуемого стронадельфита с наложением теоретических линий, соответствующих параметрам структуры Pekov et al., 2010.

Fig. 5. *a* – the EBSD-picture receiving point of the stronadelphite crystal (Fig. 2, *d*). *b* – a picture of the Kikuchi bands of the studied stronadelphite with the superposition of theoretical lines corresponding to the structure parameters Pekov et al., 2010.

других щелочно-ультраосновных массивах, например, в Ковдоре, Палаборе и Инагли. Считается (Хомьяков и др., 1997; Chakhmouradian et al., 2005; Pekov et al., 2010), что обогащенные стронцием минералы надгруппы апатита кристаллизуются на поздних, относительно низкотемпературных этапах гидротермального преобразования щелочных горных пород. Морфология и минеральная ассоциация стронадельфита из эвдиалит-эгирин-альбитовых пород Кондёрского массива отвечает данному предположению. Стронадельфит формирует ксеноморфные выделения, выполняя пространство между индивидами других минералов. Кроме того, обращает на себя внимание примесь бария, привнес которого, вероятно, связан с процессами гидротермального преобразования вмещающих пород (Осипов и др., 2017). В то же время, в составе Кондёрского стронадельфита отсутствует примесь редкоземельных элементов, характерная для образцов из Хибинского и Ловозерского массива.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-35-90067. Исследования проведены с использованием аналитических возможностей ресурсных центров Санкт-Петербургского государственного университета “Геомодель”, “Рентгенодифракционные методы исследования”.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры минералогии СПбГУ, в частности проф. А.И. Брусницыну за ценные рекомендации и комментарии к данной работе, а также сотруднику РЦ СПбГУ “Геомодель” В.В. Шиловских за помощь в анализе химических составов минералов. Особую благодарность выражаем рецензентам, исправления замечаний которых способствовали существенному улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Булах А.Г., Золотарёв А.А., Кривовичев В.Г. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов СПб.: изд-во С.-Петербур. ун-та, 2014. 133 с.

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., Степанко А.А. Геология, петрология и рудоносность Кондёрского массива. М.: Наука, 1994. 176 с.

Лазаренков В.Г., Малич К.Н., Сахьянов Л.О. Платинометаллическая минерализация зональных ультраосновных и коматитовых массивов. Л.: Недра, 1992. 217 с.

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

Мочалов А.Г. Замечательные минералы платины массива Кондёр (Хабаровский край) // Минералогический Альманах. **2019**. Т. 23. № 3. 128 с.

Орлова М.П. Геологическое строение и генезис Кондёрского ультрамафитового массива // Тихоокеанская геология. **1991**. № 1. С. 80–88.

Осипов А.С., Антонов А.А., Паникоровский Т.Л., Золотарёв-мл. А.А. Гидратированный карбонатсодержащий аналог манганозвдиалита из щелочных пород Кондёрского массива, Хабаровский край // ЗРМО. **2017**. Т. 146. № 4. С. 78–93.

Пеков И.В. Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М.: Земля, **2000**. 464 с.

Петрология и платиноносность кольцевых щелочно-ультраосновных комплексов / Ред. И.Я. Некрасов и Н.П. Лаверов. М.: Наука, **1994**. 381 с.

Хомяков А.П., Куликова И.М., Расцветаева Р.К. Фторкафит $\text{Ca}(\text{Sr},\text{Na},\text{Ca})(\text{Ca},\text{Sr},\text{Ce})_2(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – новый минерал со структурным мотивом апатита // ЗРМО. **1997**. Т. 126. № 3. С. 87–97.

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

Stronadelphite from the Alkaline Rocks of the Konder Massif (Khabarovsk krai)

A. S. Osipov^{a,*}, A. A. Antonov^{b,**}, V. N. Bocharov^{a,***}, and N. S. Vlasenko^{a,****}

^aSaint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

^bRussian Geological Research Institute (VSEGEI), Saint Petersburg, Russia

*e-mail: osipov.anst@yandex.ru

**e-mail: anthonov@yandex.ru.

***e-mail: w.bocharow@spbu.ru.

****e-mail: ly17@mail.ru

This paper presents the mineralogical characteristics of stronadelphite $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ found in the eudialyte-aegirine-albite rocks of the Konder alkaline-ultrabasic massif (Khabarovsk krai). The mineral forms xenomorphic individuals up to 400×150 micrometers. It is associated with eudialyte, lamprophyllite, barytolamprophyllite, microcline, titanite, nepheline, strontium-rich fluorapatite and other accessory minerals. Stronadelphite crystals are colourless and translucent. The chemical composition (formula is calculated based on 25 charge units) is $(\text{Sr}_{4.21}\text{Ca}_{0.61}\text{Ba}_{0.07}\text{Na}_{0.07}\text{Fe}_{0.05})_{5.01}(\text{P}_{3.01}\text{O}_{11.93})\text{F}_{1.14}$. In chemical composition, the mineral is similar to stronadelphite from alkaline complexes of Kola Peninsula. The mineral identification was confirmed by the electron backscattered diffraction (EBSD) method. The crystallization of the mineral during the low-temperature hydrothermal alteration of alkaline rocks is assumed.

Keywords: stronadelphite, Sr-bearing fluorapatite, alkaline rocks, Konder massif, alkaline-ultrabasic complex

REFERENCES

Azzi A., Atencio D., Andrade M., Contreira R. Crystal-chemistry of Y-poor hainite-(Y) from Poços de Caldas alkaline complex, Minas Gerais, Brazil. In: *Abs. of the 22nd IMA Meeting Melbourne*. **2018**. P. 226.

Azarova Yu.V. Genesis and typochemism of lamprophyllite-barytolamprophyllite series minerals from lujavrite-malignite complex of Khibiny massif. *New Data on Minerals*. **2004**. Vol. 39. P. 65–70.

Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. Structures, isomorphism, formulas, classification of minerals. Saint Petersburg: Saint Petersburg University Press, **2014**. 133 p. (*in Russian*).

Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. Strontium-apatite: new occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals. *Canad. Miner.* **2002**. Vol. 40. P. 121–136.

Chakhmouradian A.R., Huges J.M., Rakovan J. Fluorocaphite, a second occurrence and detailed structural analysis: simultaneous accommodation of Ca, Sr, Na, and LREE in the apatite atomic arrangement. *Canad. Miner.* **2005**. Vol. 43. P. 735–746.

Frezotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *J. Geochem. Expl.* **2012**. Vol. 112. P. 1–20.

Gurovich V.G., Emelyanenko E.P., Zemlyanukhin V.N., Karetnikov A.S., Kvasov A.I., Lazarenkov V.G., Malich K.N., Mochalov A.G., Prikhodko V.S., Stepashko A.A. Geology, petrology and ore mineral resources of the Konder massif. Moscow: Nauka, **1994**. 176 p. (in Russian).

Khomyakov A.P., Kulikova I.M., Rastsvetaeva R.K. Fluorocaphite $\text{Ca}(\text{Sr},\text{Na},\text{Ca})(\text{Ca},\text{Sr},\text{Ce})_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – a new mineral with an apatite-like structural motif. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1997**. Vol. 126. N 3. P. 87–97 (in Russian).

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

Lazarenkov V.G., Malich K.N., Sakhyanov L.O. Platinum ore mineralization of zonal ultrabasic and komatiite massifs. Leningrad: Nedra, **1992**. 217 p. (in Russian).

Malich K.N. Platinoids of clinopyroxenite-dunite massifs of Eastern Siberia (geochemistry, mineralogy, genesis). St. Petersburg: VSEGEI, **1999**. 296 p. (in Russian).

Mochalov A.G. Remarkable Platinum Minerals of the Konder Massif (Khabarovsk Krai, Russia). *Mineralogical Almanac*. **2019**. Vol. 23. N 3. P. 128 (in Russian).

Miyajima H. Jadeitite from Itoigawa, Niigata Prefecture, central Japan. In: *Abs. of the 21st IMA Meeting Johannesburg*. **2014**. 200 p.

Nekrasov I.Ya., Lennikov A.M., Oktyabrsky R.A. Petrology and platinum-bearing properties of ring alkaline-ultrabasic complexes. Moscow: Nauka, **1994**. 381 p.

Orlova M.P. Geological structure and genesis of the Konder ultramafic massif. *Pacific Geol.* **1991**. Vol. 1. P. 80–88 (in Russian).

Osipov A.S., Antonov A.A., Panikorovskii T.L., Zolotarev-jr. A.A. Hydrated CO_3 -bearing analog of manganoeudialyte from alkali pegmatites of the Konder Pluton, Khabarovsk Krai. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2017**. Vol. 126. N 4. P. 78–93 (in Russian, English translation: Geol. Ore Deposits. **2018**. Vol. 60. N.8. P. 1–10).

Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C., Pekov I.V., Rakovan J., White T.J. Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *Eur. J. Miner.* **2010**. Vol. 22. P. 163–179.

Pekov I.V. Lovozero massif: history, pegmatites, minerals. Moscow: Ocean Pictures Ltd., **2000**. 480 p. (in Russian).

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

Penel G., Leroy G., Rey C., Sombret B., Huvenne J.P., Bres E. Infrared and Raman microspectrometry study of fluor-fluor-hydroxy and hydroxy-apatite powders. *J. materials sci.: materials in medicine*. **1997**. Vol. 8. P. 271–276.

Petrology and platinum-bearing properties of circular alkaline-ultrabasic complexes. Eds. I.Ya. Nekrasov, N.P. Laverov Moscow: Nauka, **1994**. 381 p. (in Russian).

Xue W., Zhai K., Lin C., Zhai S. Effect of temperature on the Raman spectra of $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ fluorapatite. *Eur. J. Miner.* **2018**. Vol. 30. P. 951–956.

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

Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Yu., Pakhomovsky Ya.A., Selivanova E.A., Korchak Ju.A., Nikolaev A.P. Strontiofluorite, SrF_2 , a new mineral species from the Khibiny massif, Kola Peninsula, Russia. *Canad. Miner.* **2010**. Vol. 48. P. 1487–1492.

Zhai S., Shieh S.R., Xue W., Xie T. Raman spectra of stronadelphite $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ at high pressures. *Phys. Chem. Miner.* **2015**. Vol. 24. P. 579–585.