

УДК 549.7 (234.853)

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-2

О ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ «УРАНПИРОХЛОРА» И ФТОРКАЛЬЦИОПИРОХЛОРА В ЩЕЛОЧНЫХ ПЕГМАТИТАХ ВИШНЁВЫХ ГОР НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

В.И. Попова, В.А. Попов, И.А. Блинов, В.А. Котляров, С.М. Лебедева

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru

Статья поступила в редакцию 06.08.2021 г., принята к печати 19.04.2022 г.

A SEQUENCE OF FORMATION OF «URANPYROCHLORE» AND FLUOROCALCIOPYROCHLORE IN ALKALI PEGMATITES FROM THE VISHNEVYE MOUNTAINS, SOUTH URALS

V.I. Popova, V.A. Popov, I.A. Blinov, V.A. Kotlyarov, S.M. Lebedeva

¹ South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy
Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru

Received 06.08.2021, accepted 19.04.2022

Аннотация. Рассмотрена последовательность образования разных по морфологии и составу кристаллов пирохлора в агрегате с ильменитом и полевыми шпатами из нефелин-полевошпатового пегматита на г. Долгой (Вишнёвые горы, Южный Урал): измененного желтовато-зеленого «уранпирохлора» с содержанием UO_3 7.62–42.44 мас. % в разных участках кристалла, а также фторкальциопирохлора, ферсмита и ассоциирующих минералов. Изменения «уранпирохлора» проявлены в ферсмитизации и окремнении в отличие от более поздних фторкальциопирохлора и ферсмита. Приведены составы и КР-спектры измененного «уранпирохлора» и позднего фторкальциопирохлора.

Ключевые слова: титанониобаты, «уранпирохлор», фторкальциопирохлор, ферсмит, последовательность образования, Вишнёвые горы, Южный Урал.

Abstract. The sequence of formation of pyrochlore crystals of various morphology and composition is considered in an aggregate with ilmenite and feldspar from nepheline-feldspar pegmatite at Mt. Dolgaya (Vishnevye Mountains, South Urals): altered yellowish green «uranium pyrochlore» with a UO_3 content of 7.62–42.44 wt. % in different parts of the crystal, as well as fluorocalciopyrochlore, fersmite, and associated minerals. The alteration of «uranpyrochlore» includes fersmitization and silicification in contrast to relatively late fluorocalciopyrochlore and fersmite. The compositions and Raman spectra of altered «uranpyrochlore» and later fluorocalciopyrochlore are given.

Keywords: titanoniobates, «uranpyrochlore», fluorocalciopyrochlore, fersmite, formation sequence, Vishnevye Mountains, Southern Urals.

Для цитирования: Попова В.И., Попов В.А., Блинов И.А., Котляров В.А., Лебедева С.М. О последовательности образования «уранпирохлора» и фторкальциопирохлора в щелочных пегматитах Вишнёвых гор на Южном Урале, Средний Урал. Минералогия, 8(2), 15–22. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-2

For citation: Popova V.I., Popov V.A., Blinov I.A., Kotlyarov V.A., Lebedeva S.M. A sequence of formation of «uranpyrochlore» and fluorocalciopyrochlore in alkali pegmatites from the Vishnevye Mountains, South Urals. Mineralogy, 8(2), 15–22. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-2.

Введение

Вишнёвые горы на Южном Урале с XIX в. известны открытием и обработкой россыпей золота и циркона в долинах рек Большой Маук и Горькая, а позднее – добычей полевого шпата, циркона и ниобиевых руд из жил щелочных пегматитов, вскрытых карьерами и подземными горными выработками шахты «Капитальная». С 1993 г. полевошпатовое и нефелин-полевошпатовое сырье добывается в Полевошпатовом карьере (ныне карьер «Надежда») на горах Долгой и Кобелева. Этими карьерами в миаскитах вскрыты многочисленные жильные тела щелочных пегматитов с разнообразной минерализацией.

Ранее отмечалось, что пироксид из сиенитовых пегматитов характеризуется повышенным содержанием урана (Иванов и др., 1944). В миаскитовых пегматитах Курочкина Лога и горы Каравай на схемах последовательности выделения минералов Э.М. Бонштедт-Куплетская (1951) указывала две генерации пироксидов, а урансодержащий пироксид («гатчеттолит») с содержанием 3.33 мас. % U_3O_8 отмечен в центральной части кристалла из жилы № 5 на г. Каравай. В центральных участках темно-зеленых, зеленых и желто-зеленых кристаллов бетафита с содержанием ~ 20 мас. % UO_3 из полевошпатовых, биотит-полевошпатовых и кварц-полевошпатовых пегматитов выявлен существенный дефицит катионов в позиции А. Рассчитанная нами формула одного анализа из работы (Еськова и др., 1964, табл. 27, ан. 2) имеет вид $(\square Ca_{0.48} U_{0.26} Mg_{0.02} Mn_{0.02} REE_{0.11} \Sigma_{0.89} (Nb_{1.03} Ti_{0.87} Ta_{0.02} Fe^{3+}_{0.08} \Sigma_{2.00} O_{5.67} \cdot 1.64 H_2O$ (Попова и др., 2018).

В севидах-I (силикокарбонатитах) Центральной щелочной полосы Вишнёвогорского массива отмечался черный «уранпироксид» с содержанием U_3O_8 14.5–23.8 мас. % и возрастом 378 ± 4.9 млн лет (Недосекова, Беляцкий, 2012). Последующие преобразования пород и щелочных пегматитов связываются с уральской коллизией (~350–250 млн лет) и постколлизийным растяжением (~250–230 млн лет) с формированием жил с фторкальций-пироксидом (Недосекова и др., 2020), т. е. почти через 130 млн лет после «уранпироксидов».

Ранее в обзорной монографии «Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала» (Левин и др., 1997) приведены средние составы пироксидов из карбонатитов расположенного южнее Потанинского месторождения ниобиевых руд. Отмечалось, что составы черных и коричнево-черных пироксидов характе-

ризуются повышенными содержаниями U_3O_8 (до 23 мас. %) и TiO_2 (до 10 мас. %) и минералы нередко имеют позднюю «кайму» коричнево-красного пироксидов с меньшими содержаниями U_3O_8 (<10 мас. %) и TiO_2 (до 1–3 мас. %).

В 2014 г. в Вишнёвых горах в щелочном пегматите из карьера на г. Долгой нами были встречены образцы с разными по морфологии пироксидов; целью статьи является исследование их взаимоотношений и состава.

Материалы и методы исследования

Образцы отобраны в северо-западном уступе Полевошпатового карьера на горизонте 372 м на участке с координатами 55°59'4" с.ш., 60°37'30" в.д. из нефелин-полевошпатового пегматита с редкоземельно-редкометалльными минералами (рис. 1).

Образец оптически исследован в Институте минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Состав минералов определен с использованием СЭМ РЭММА-202М с ЭДС LZ-5 Link с Si-Li-детектором (ускоряющее напряжение 20 кВ, аналитик В.А. Котляров) и VEGA3 TESCAN SBU с ЭДА Oxford Instruments X-act (ускоряющее напряжение 20 кВ, время набора спектра 120 с, аналитик И.А. Блинов). Для части зерна желтовато-зеленого «уранпироксидов» получены карты распределения элементов (аналитик И.А. Блинов). Рентгенограмма порошка «уранпироксидов» снята на дифрактометре Shimadzu XRD-6000, $CuK\alpha$ -излучение с графитовым монохроматором, скорость съемки 1°/мин. (П.В. Хворов). Спектры комбинационного рассеяния (КР) минералов получены на спектрометре iNR 320 LabRAM с He-Ne лазером (длина волны возбуждения 632.8 нм), спектральная ширина щели 2 cm^{-1} (аналитик С.М. Лебедева). КР спектры минералов диагностированы с использованием базы данных RRUFF (<http://rruff.info>) и полученных данных о химическом составе минералов.

Результаты исследования

В 2017 г. в одном из образцов (№ В-30, размер $5 \times 3 \times 2$ см) в агрегате ильменита с полевыми шпатами выявлены два отличающихся по внешнему виду минерала. Наиболее интересно включение размером ~ 5 мм желтовато-зеленого зерна урансодержащего титанониобата-1 (далее – «уранпироксидов») с серией секущих трещин, часть которых прослеживает-



Рис. 1. Вид северо-западной части Полевошпатового карьера в 2014 г. на г. Долгой и уступа горизонта 372 м. На заднем плане – г. Кобелева. Красным кругом обозначено место отбора образца.

Fig. 1. [Northwestern part of the Polevoshpatovy (Fedlspar) quarry at Mt. Dolgaya in 2014 and the ledge of a horizon of 372 m.

Background – Mt. Kobeleva. Red circle marks a sampling area.

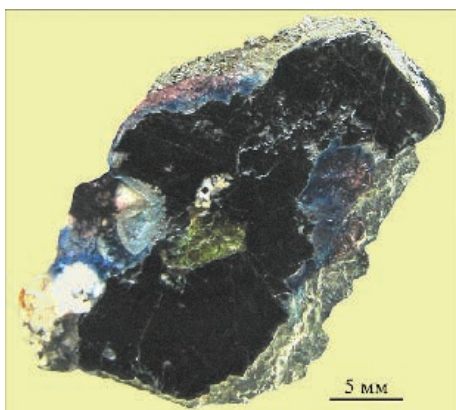


Рис. 2. Зерно измененного желтовато-зеленого «уранпирохлора» (в центре) в ильмените (черное) с мелкими вростками полевых шпатов, аннита, коричневого фторкальциопирохлора, ферсмита, галенита и цеолитов.

Fig. 2. Grain of altered yellowish green «uranpyrochlore» (in the center) in ilmenite (black) with small inclusions of feldspars, annite, brown fluorocalciopyrochlore, fersmite, galena and zeolites.

ся в ильмените (рис. 2). Вокруг «уранпирохлора» в ильмените видны и дополнительные радиальные трещины, вероятно, возникшие в результате увеличения объема «уранпирохлора» при метамиктном преобразовании.

В ильменит-полевошпатовом агрегате этого образца в ассоциации с ферсмитом выявлены мелкие кристаллы (0.05–0.5 мм) пирохлора-2 – коричневого фторкальциопирохлора, почти не содержа-

щего урана. Такое близкое нахождение в едином минеральном агрегате разных по виду и составу пирохлоров в щелочном пегматите Вишнёвых гор встречено впервые. В ильменит-полевошпатовом агрегате дополнительно выявлены вростки анальцима, флогопита, вермикулита, селадонита, галенита, рутила и цеолитов.

Желтовато-зеленое зерно «уранпирохлора» с участками собственных граней (частично – с индукционными поверхностями с ильменитом и полевыми шпатами) характеризуется неоднородностью цвета и трещиноватостью (рис. 3).

Для участка зерна получены карты распределения содержаний Nb, Ti, U, Ca, Na, K, Fe, Y, Si, Al, O и F (рис. 4). Периферическая часть этого участка измененного зерна «уранпирохлора» немного обогащена Nb, Si, Fe, но обеднена U, Ca и Al. На внешней поверхности зерна «уранпирохлора» выявлены наросты шамозита, аннита, калиевого полевого шпата, альбита и натролита, а в полостях тонких трещин – отдельные микрозерна уранпирохлора и флюорита.

Дифрактограмма микроколичества желтовато-зеленого зерна «уранпирохлора» характеризовалась галло (без пиков), как у метамиктного материала. В его химическом составе выявлены вариации содержаний CaO, Nb₂O₅, F и суммы анализов. Характерны повышенные содержания UO₃, TiO₂, SiO₂ и примеси Al₂O₃ при пониженных – Na₂O, CaO и F (таблица, ан. 1g–4j, рис. 3б).

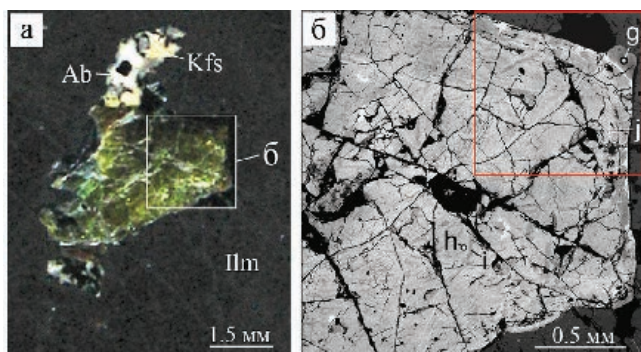


Рис. 3. Участки исследования состава желтовато-зеленого зерна измененного «уранпироксена» (а, б) в агрегате ильменита с полевыми шпатами из пегматита г. Долгой.

а – отраженный свет; б – BSE фото (красным оговорен участок элементного картирования); g, h, i, j – точки анализа в таблице. Ab – альбит, Kfs – калиевый полевой шпат, Ilm – ильменит.

Fig. 3. Areas of study of the composition of the yellowish green grain of altered «uranpyrochlore» (a, б) in the ilmenite aggregate with feldspars from pegmatite of Mt. Dolgaya.

a – reflected light; б – BSE photo (red square, area of elemental mapping); g, h, i, j – analytical points (Table). Ab – albite, Kfs – K-feldspar, Ilm – ilmenite.

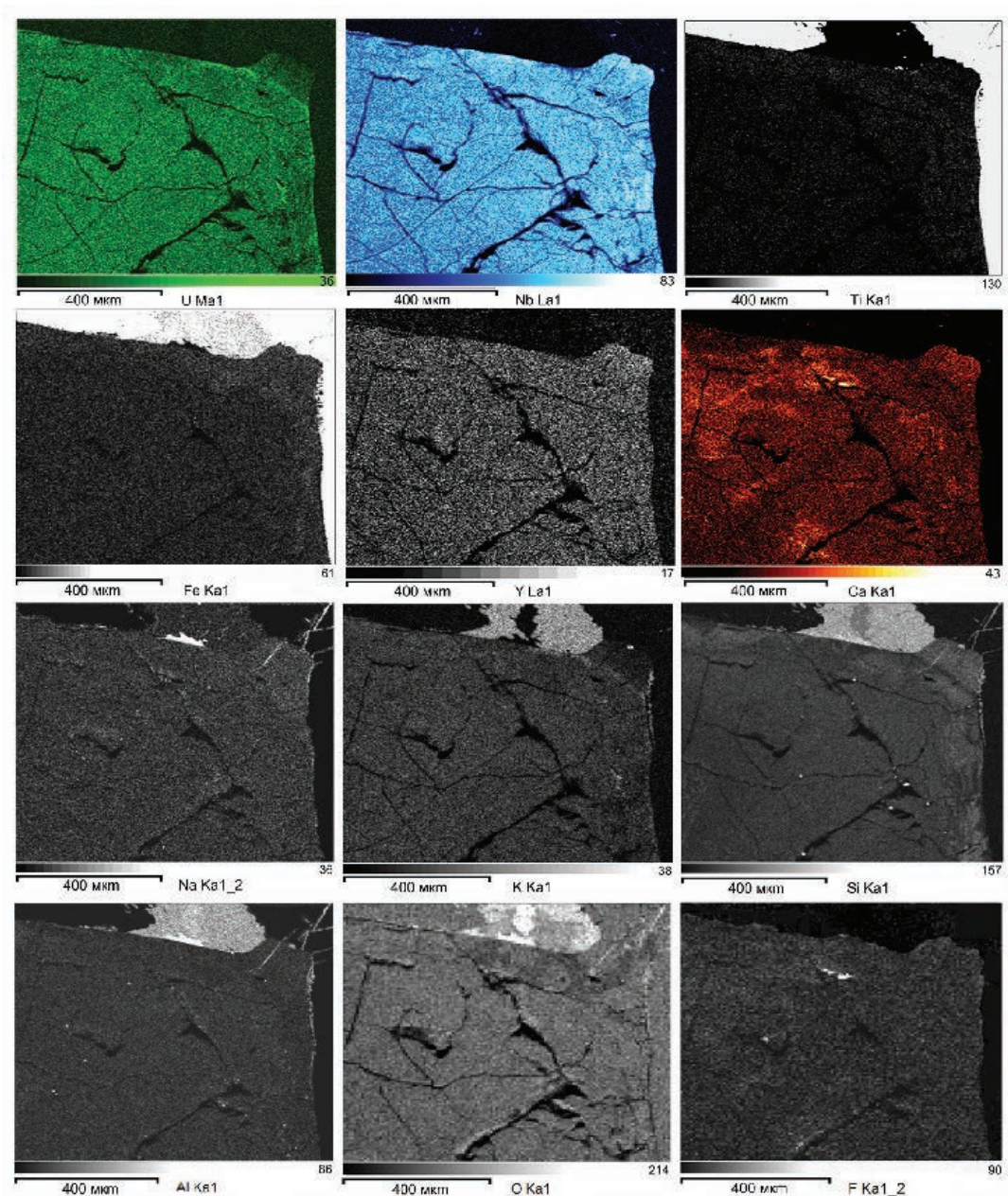


Рис. 4. Карты распределения элементов в исследованном участке «уранпироксена».

Fig. 4. Elemental maps in the studied area of the «uranpyrochlore» grain.

Таблица

Химический состав (мас. %) измененного желтовато-зеленого «уранпирохлора» (1g–4j), ферсмита (5a, 6b) и коричневого фторкальциопирохлора (7c–10f)

Table

Chemical composition (wt. %) of altered yellowish green «uranpyrochlore» (1g–4j), fersmite (5a, 6b), and brown fluorocalciopyrochlore (7c–10f)

№ ан.	Na ₂ O	CaO	SrO	FeO	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	UO ₃	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F	Сумма
1g	0.89	6.46	3.26	1.54	—	—	0.80	7.66	44.56	1.74	6.40	10.76	1.20	0.90	87.03
2h	—	9.37	1.02	—	—	—	0.34	20.40	43.01	0.90	6.53	4.70	0.65	1.22	88.14
3i	—	10.04	0.88	—	—	—	0.44	16.12	45.74	1.28	6.29	5.97	1.00	1.65	89.41
4j	—	4.54	0.50	—	—	0.50	0.51	42.44	32.29	—	3.36	4.06	0.56	—	88.76
5a	1.77	10.85	4.33	0.54	—	—	0.76	—	60.80	—	4.34	3.91	0.40	1.13	89.28
6b	1.73	11.71	4.46	0.23	—	—	0.73	—	61.05	1.39	4.47	4.63	—	1.83	92.23
7c	6.96	16.23	0.55	—	—	0.37	0.74	—	64.15	1.55	3.36	—	—	4.32	98.23
8d	6.67	16.80	0.85	—	1.03	—	0.21	—	62.91	1.84	3.66	—	—	4.36	98.33
9e	6.96	16.55	0.77	—	0.76	—	0.71	0.25	63.21	1.72	3.54	—	—	4.07	98.54
10f	7.50	15.45	0.85	—	0.64	—	0.39	—	65.40	1.68	2.15	—	—	4.42	98.48
№ ан.	Расчетные формулы на сумму катионов Nb, Ta, Ti, Si и Al = 2														
1g	$(\text{Ca}_{0.37}\text{Sr}_{0.15}\text{Na}_{0.09}\text{U}_{0.09}\text{Fe}_{0.09}\text{K}_{0.06}\text{Ce}_{0.02})_{0.87}(\text{Nb}_{1.07}\text{Si}_{0.57}\text{Ti}_{0.26}\text{Al}_{0.08}\text{Ta}_{0.02})_{2.00}\text{O}_{5.42}\text{F}_{0.15} \cdot n\text{H}_2\text{O}$														
2h	$(\text{Ca}_{0.67}\text{U}_{0.29}\text{Sr}_{0.04}\text{Ce}_{0.01})_{1.01}(\text{Nb}_{1.29}\text{Ti}_{0.33}\text{Si}_{0.31}\text{Al}_{0.05}\text{Ta}_{0.02})_{2.00}\text{O}_{6.20}\text{F}_{0.26} \cdot n\text{H}_2\text{O}$														
3i	$(\text{Ca}_{0.65}\text{U}_{0.21}\text{Sr}_{0.03}\text{Ce}_{0.01})_{0.90}(\text{Nb}_{1.26}\text{Si}_{0.36}\text{Ti}_{0.29}\text{Al}_{0.07}\text{Ta}_{0.03})_{2.00}\text{O}_{5.92}\text{F}_{0.32} \cdot n\text{H}_2\text{O}$														
4j	$(\text{U}_{0.82}\text{Ca}_{0.45}\text{Sr}_{0.03}\text{Ce}_{0.02}\text{La}_{0.02})_{1.34}(\text{Nb}_{1.34}\text{Si}_{0.37}\text{Ti}_{0.23}\text{Al}_{0.06})_{2.00}\text{O}_{7.61} \cdot n\text{H}_2\text{O}$														
5a	$(\text{Ca}_{0.66}\text{Na}_{0.20}\text{Sr}_{0.14}\text{Fe}_{0.03}\text{Ce}_{0.01}\text{Th}_{0.01})_{1.06}(\text{Nb}_{1.56}\text{Si}_{0.22}\text{Ti}_{0.19}\text{Al}_{0.03}\text{Ta}_{0.02})_{2.00}\text{O}_{5.74}\text{F}_{0.20} \cdot n\text{H}_2\text{O}$														
6b	$(\text{Ca}_{0.70}\text{Na}_{0.19}\text{Sr}_{0.14}\text{Ce}_{0.01}\text{Fe}_{0.01})_{1.05}(\text{Nb}_{1.53}\text{Si}_{0.26}\text{Ti}_{0.19})_{1.97}\text{O}_{5.75}\text{F}_{0.32} \cdot n\text{H}_2\text{O}$														
7c	$(\text{Ca}_{1.09}\text{Na}_{0.84}\text{Sr}_{0.02}\text{Ce}_{0.02}\text{La}_{0.01})_{1.98}(\text{Nb}_{1.82}\text{Ti}_{0.16}\text{Ta}_{0.03})_{2.01}\text{O}_{6.49}\text{F}_{0.86}$														
8d	$(\text{Ca}_{1.14}\text{Na}_{0.82}\text{Sr}_{0.03}\text{Y}_{0.03}\text{Ce}_{0.01})_{2.03}(\text{Nb}_{1.79}\text{Ti}_{0.17}\text{Ta}_{0.03})_{1.99}\text{O}_{6.55}\text{F}_{0.87}$														
9e	$(\text{Ca}_{1.12}\text{Na}_{0.85}\text{Sr}_{0.03}\text{Y}_{0.03}\text{Ce}_{0.02}\text{U}_{0.003})_{2.05}(\text{Nb}_{1.80}\text{Ti}_{0.17}\text{Ta}_{0.03})_{2.00}\text{O}_{6.56}\text{F}_{0.81}$														
10f	$(\text{Ca}_{1.05}\text{Na}_{1.01}\text{Sr}_{0.03}\text{Y}_{0.02}\text{Ce}_{0.01})_{2.12}(\text{Nb}_{1.87}\text{Ti}_{0.10}\text{Ta}_{0.03})_{2.00}\text{O}_{6.58}\text{F}_{0.88}$														

Примечание. Образец В-30. Сумма анализов включает 0.86 мас. % K₂O (ан. 1g) и 0.45 мас. % ThO₂ (ан. 5a).

Note. Sample B-30. The analytical sum includes 0.86 wt. % K₂O (an. 1g) and 0.45 wt. % ThO₂ (an. 5a).

За пределами желтовато-зеленого зерна «уранпирохлора» зерна ферсмита и коричневого фторкальциопирохлора характеризуются сложными (индукционными) ограничениями в результате их сокристаллизации с ильменитом, полевыми шпатами и слюдами (рис. 5). Содержание Nb₂O₅ в ферсмите составляет ~60 мас. %, уран не обнаружен; в некоторых анализах присутствует небольшая примесь SiO₂ (рис. 5a; таблица, ан. 5a, 6b); В составе фторкальциопирохлора определены обычные высокие содержания оксидов Ca, Na, Nb, F при меньших – Ti и почти полном отсутствии U (таблица, ан. 7c, 8d, 9e, 10f).

КР-спектры зерен желтовато-зеленого «уранпирохлора» и красновато-коричневого фторкальциопирохлора отличаются (рис. 6). Для сравнения приведены КР-спектры некоторых минералов из базы данных RRUFF – фторкальциопирохлора, ферсмита, гидропирохлора и уранофана.

Обсуждение результатов и выводы

Результаты электронно-микроскопических анализов желтовато-зеленого зерна «уранпирохлора» и карты распределения в нем ряда элементов отражают неоднородность его состава, что более проявлено для U, Nb, Ca, Si, O и F и указывает на минеральные смеси продуктов метамиктного преобразования и частичного отложения некоторых минералов в полостях тонких трещин. Например, анализ № 1g может отражать микрозернистый агрегат, состоящий из смеси ферсмита и, возможно, уранофана и опала. Анализы № 2h (с повышенным содержанием U и меньшим – Si) и № 3i близки смеси ферсмита и уранофана. Анализ № 4j микрозерна размером ~6 мкм наиболее богат ураном и по составу близок оксиуранпирохлору с небольшой примесью Si и Al.

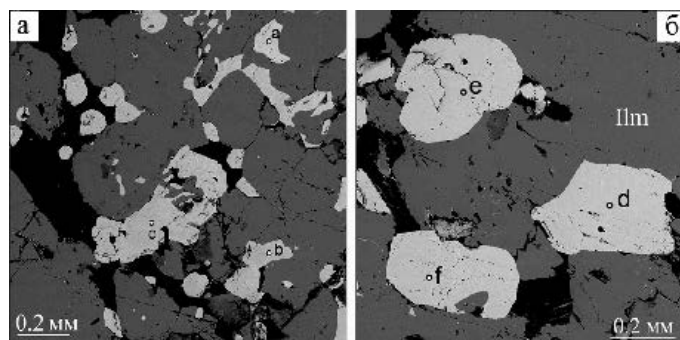


Рис. 5. Зерна красновато-коричневого фторкальциопироклора (a, d, e, f) и ферсмита (c, b) в агрегате ильменита (Ilm) с полевым шпатом (черное).

Здесь и на рис. 6, образец В-30. BSE фото.

Fig. 5. Small grains of reddish brown fluorcalciopyrochlore (a, d, e, f) and fersmite (c, b) in ilmenite aggregate (Ilm) with feldspar (black).

Here and in Fig. 6, sample B-30. BSE photo.

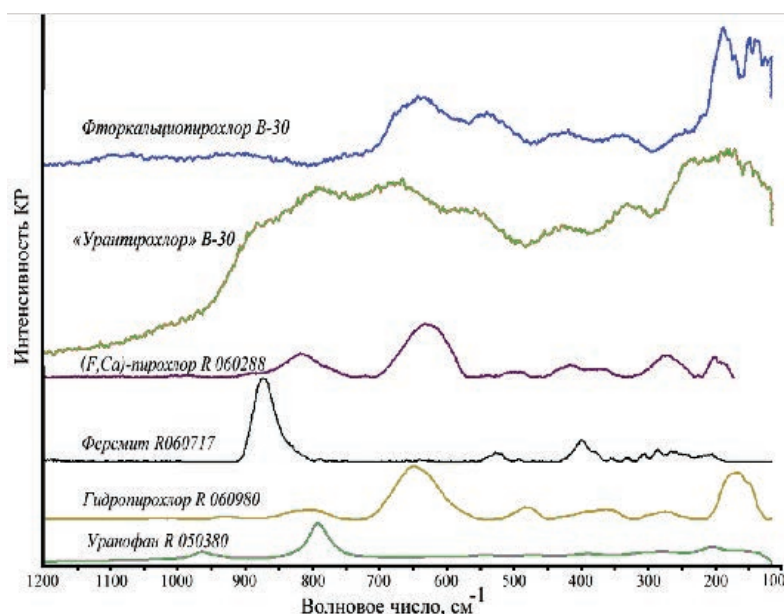


Рис. 6. КР-спектры фторкальциопироклора и «уранпироклора» в сопоставлении с КР-спектрами (F-Ca)-пироклора, ферсмита, гидропироклора и уранофана из базы RRUFF (<http://rruff.info>).

Fig. 6. Raman spectra of fluorcalciopyrochlore and «uranpyrochlore» in comparison with Raman spectra of (F-Ca)-pyrochlore, fersmithe, hydropyrochlore and uranophane from the RRUFF base (<http://rruff.info>).

За пределами желтовато-зеленого зерна «уранпироклора» в агрегате ильменита с полевыми шпатами и мелкими зернами флогопита, анальцима, селадонита и рутила химические составы ферсмита и фторкальциопироклора более обычны (таблица, ан. 7с, 8d, 9е, 10f).

Ранее отмечалось, что в результате метамиктизации и гидратации объем кристаллов пироклора из жил Вишнёвых гор увеличивается почти на 30 % с развитием радиальных трещинок вокруг них в хрупких минералах, а индивиды слоистых силикатов около кристаллов пироклора деформируют-

ся с образованием микроскладчатости (Чесноков, 1960). Вопросы стабильности и фазовых превращений кристаллических и метамиктных пироклоров из карбонатитов Восточного Саяна (вероятно, Белозиминского месторождения) ранее были рассмотрены в обзорной статье В.С. Гайдуковой и Г.А. Сидоренко (1983). Проведенные ими эксперименты по прокаливанию при 1000–1200 °С образцов пироклора, содержащего 4.00–11.81 мас. % UO_3 , показали, что в некоторых из них рентгенографически и под электронным микроскопом выявлены либо пироклор с ферсмитом, либо только ферсмит.

Исследованное нами включение измененного желтовато-зеленого «уранпирохлора» в ильмените из Вишнёвых гор в процессе микроэлементного картирования под электронным микроскопом частично «вспухло» и раскрошилось; его микроколичество рентгеноаморфно. Можно предполагать, что при изменении температуры минералообразования первичное зерно «уранпирохлора» претерпело метамиктные превращения, что привело к увеличению его объема и изменению состава с новообразованием нанозернистого полиминерального агрегата. Морфологические признаки минерального агрегата изученного образца из Вишнёвых гор указывают, что при образовании пирохлоровой минерализации в нефелин-полевошпатовом пегматите последовательно кристаллизовались три разных титанониобата: ранний желтовато-зеленый «уранпирохлор» и более поздние коричневый фторкальциопирохлор и ферсмит в агрегате ильменита с полевыми шпатами и аннитом. Ранее отмечалось (Недосекова и др., 2020), что в силикокарбонатитах Центральной щелочной полосы Вишнёвогорского массива черный уранпирохлор с содержанием U_3O_8 14.5–23.8 мас. % имеет возраст 378 ± 4.9 млн лет, а жильная минерализация с фторкальциопирохлором – 250–230 млн лет. Приведенный нами пример локализации в едином минеральном агрегате «уранпирохлора» и фторкальциопирохлора (практически без урана) с индукционными границами сокристаллизации с ильменитом и полевыми шпатами указывает на их последовательное образование при близком относительном возрасте.

Работа выполнена по теме государственного задания Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № АААА-А21-121012090018-3.

Литература

Бонштедт-Куплетская Э.М. (1951) Минералогия щелочных пегматитов Вишнёвых гор. М., АН СССР, 170 с.

Гайдукова В.С., Сидоренко Г.А. (1983) О стабильности и фазовых превращениях пирохлора. Новые данные о минералах СССР. Труды Минералогического музея, 31, 31–41.

Еськова Е.М., Жабин А.Г., Мухитдинов Г.Н. (1964) Минералогия и геохимия редких элементов Вишнёвых гор. М., Наука, 319 с.

Иванов А.А., Боровский И.Б., Ярош Н.А. (1944) Ниобийсодержащие минералы Вишнёвых гор на Урале. Труды Горно-геологического института УФАИ СССР, 5, 1–20.

Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселев А.П. (1997). Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург, Уралгеолком, 274 с.

Недосекова И.Л., Беляцкий Б.В. (2012) Возраст и источники вещества Ильмено-Вишнёвогорского щелочного комплекса (Ю. Урал): изотопные Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb и Lu-Hf данные. Доклады Академии наук, 446(1), 71–76.

Недосекова И.Л., Коротеев В.А., Баянова Т.Б., Серов П.А., Попова В.И., Червяковская М.В. (2020) О возрасте пирохлоровых карбонатитов Ильмено-Вишнёвогорского щелочного комплекса, Южный Урал (по данным Sm-Nd и Rb-Sr изотопных методов). Литосфера, 20(4), 486–498.

Попова В.И., Попов В.А., Блинов И.А., Котляров В.А. (2018) Новые данные о пирохлорах щелочных пегматитов и рудных зон Вишнёвых гор (Южный Урал). Минералогия, 4(3), 46–60.

Чесноков Б.В. (1960) Сравнительная характеристика физических свойств кристаллических и метамиктных пирохлоров Вишнёвых гор. Материалы по геологии и разведке полезных ископаемых Урала. Труды СГИ, 37. Госгеолтехиздат, 183–191.

References

Bonstedt-Kupletskaya E.M. (1951) [Mineralogy of alkali pegmatites of the Vishnevy Mountains]. Moscow, AN SSSR, 176 p. (in Russian)

Chesnokov B.V. (1960) [Comparative characteristics of physical properties of crystalline and metamict pyrochlore of the Vishnevy Mountains]. Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Urala. Trudy SGI [Materials on Geology and Exploration of the Urals. Proceedings of the Sverdlovsk Mining Institute], 37, 183–191. (in Russian)

Es'kova E.M., Zhabin A.G., Muchitdinov G.N. (1964) [Mineralogy and geochemistry of rare elements of the Vishnevy Mountains]. Moscow, Nauka, 319 p. (in Russian)

Gaydukova V.S., Sidorenko G.A. (1983) [Stability and phase transformations of pyrochlore]. Novye dannye o mineralakh SSSR. Trudy Mineralogicheskogo muzeya [New data on minerals of USSR. Proceedings of the Mineralogical Museum], 31, 31–41. (in Russian)

Ivanov A.A., Borovsky I.B., Yarosh N.A. (1944) [Nb-bearing minerals of the Vishnevy Mountains in the Urals]. Trudy gorno-geologicheskogo instituta UFAN SSSR [Proceedings of the Mining and Geological Institute UB AN UdSSR], 5, 1–18. (in Russian)

Levin V.Ya., Ronenson B.M., Samkov V.S., Levina I.A., Sergeev N.S., Kiselev A.P. (1997) [Alkali-carbonatite complexes of the Urals]. Yekaterinburg, Uralgeolkom, 274 p.

Nedosekova I.L., Belyatsky B.V. (2012) Age and substance sources of the Ilmeno-Vishnevogorsky alkaline complex (South Urals): Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb and Lu-Hf isotope data. *Doklady Earth Sciences*, **446**, 1071–1076.

Nedosekova I.L., Koroteev V.A., Bayanova T.B., Serov P.A., Popova V.I., Chervyakovskaya M.V. (2020) [Age of pyrochlore carbonatites from the Ilmeno-Vishnevogorsky alkaline complex, South Urals: insights from Rb-Sr and Sm-Nd isotope data]. *Litosfera [Litosphere]*, **20**(4), 486–498. (in Russian)

Popova V.I., Popov V.A., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. (2018) [New data on pyrochlore of alkali pegmatites and ore zones of the Vishnevye Mountains (Southern Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **4**(3), 46–60. (in Russian)