

Рудные ниобиевые минералы группы пирохлора карбонатитовых комплексов Урала: особенности состава и геохимическая эволюция

Ирина Леонидовна НЕДОСЕКОВА*,
Сергей Владимирович ПРИБАВКИН**

Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Россия, Екатеринбург

Актуальность исследований определяется широким развитием карбонатитовых комплексов линейного типа в складчатых областях, их более слабой изученностью по сравнению с платформенными карбонатитовыми комплексами, в том числе их рудного потенциала. Актуальными вопросами остаются генезис Zr–Nb–REE-оруденения, соотношение рудной минерализации с магматическим фазами внедрения и процессами метаморфизма, а также длительность формирования редкометалльных месторождений в линейных карбонатитовых комплексах складчатых областей.

Цель исследований – разработка проблемы редкометалльного рудообразования в линейных карбонатитовых комплексах складчатых областей на примере Урала, включая характеристику рудных минералов группы пирохлора, особенностей их состава и геохимической эволюции.

Результаты исследований. Изучены особенности состава и геохимической эволюции рудных ниобиевых минералов группы пирохлора из основных типов пород редкометалльных месторождений, связанных со щелочно-карбонатитовыми комплексами Урала. Исследованы пирохлоры Вишневогорского и Потанинского месторождений ниобия, рудопроявлений Увильды и Гургино (Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс), а также Булдымского REE–Nb месторождения (Булдымский ультраабазит-карбонатитовый комплекс), Южный Урал. Установлены несколько минеральных видов пирохлора – гидроксил- и оксикальцийпирохлор U(Ta)-содержащий, фторкальцийпирохлор (в том числе Ta- и Sr–REE содержащие разновидности), гидроксилкальцийпирохлор, кено- и гидропирохлор. Их формирование которых связано с определенными эволюционными стадиями функционирования щелочно-магматической системы и вторичными преобразованиями пирохлоров. Закономерности эволюции химизма пирохлоров – последовательное изменение составов уранпирохлора с увеличением F и Nb (раннекарбонатитовый тренд) и резкая смена состава кристаллизующихся фторкальцийпирохлоров (позднекарбонатитовый тренд) – фиксируют резкую смену условий и химизма среды минералообразования.

Выводы. Проведенные исследования рудных ниобиевых минералов группы пирохлора редкометалльных месторождений, связанных с линейными карбонатитовыми комплексами Урала, свидетельствуют о том, что руды месторождений были сформированы в результате двух этапов рудообразования.

Ключевые слова: пирохлор, ниобиевые месторождения, линейные карбонатитовые комплексы, Урал.

Введение
Карбонатитовые комплексы линейного типа известны как важный источник редкометалльно-редкоземельной (Nb, Zr, P3Э) и самоцветной минерализации. Они выявлены как на территории России (Ильмено-Вишневогорский, Булдымский, Урал; Пенченгинский, Енисейский кряж), так и за рубежом (Сиилингъярви, Финляндия; Черниговский, Украина; Лонни, Пери-Ривер, Верайти, Кастингтон, Кравье, Нисикатч, Канада) [1]. С карбонатитами этого типа связаны промышленные месторождения ниобия и циркония. На Урале это Вишневогорское и Потанинское ниобиевые месторождения, а также ряд рудопроявлений – Светлоозерское, Увильдинское, Байдашевское, Ишкульское и другие, связанные с карбонатитами миаскитового массива и его фенитового ореола. Кроме того, известны редкоземельно-ниобиевые Булдымское и Спирихинское месторождения, а также Халдихинское и Ильменское рудопроявления, приуроченные к породам ультраосновного состава.

Рудная ниобиевая минерализация карбонатитовых комплексов Урала представлена минералами группы пирохлора, реже встречающаяся колумбит, эшинит, ферсмит, ильменорутит, чевкинит-(Ce) [В. Я. Левин и др., 1997]. Основным рудным минералом, резко доминирующим над другими, является пирохлор. Его изучением занимались многие исследователи редкометалльных месторождений Ильмено-Вишневогорского комплекса – Э. М. Бонштедт-Куплетская [2], Е. М. Еськова, И. И. Назаренко [3], Е. М. Еськова, А. Г. Жабин, Г. Н. Мухитдинов [4], А. Ф. Ефимов и др. [5], В. Я. Левин и др., [6], В. И. Попова и др. [7]. Результаты этих исследований показали, что минералы группы пирохлора разнообразны по составу и могут быть отнесены к разным минеральным видам.

Несмотря на значительную изученность минералов группы пирохлора карбонатитовых комплексов Урала, до настоящего времени остаются актуальными вопросы генезиса Nb-оруденения и длительности этапов рудообразования на месторождениях, связанных с линейными карбонатитовыми комплексами. Целью наших исследований является разработка фундаментальной проблемы редкометалльного рудообразования в линейных карбонатитовых комплексах на примере Урала, включая характеристику рудной редкометалльной минерализации, изучение особенностей состава рудных минералов, их геохимической эволюции, а также оценку длительности формирования редкометалльного оруденения.

Краткая геологическая характеристика карбонатитовых комплексов и месторождений пирохлора

Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс находится на стыке Среднего и Южного Урала, в осевой части Сысертско-Ильменогорского антиклинория, который представляет собой блок докембрийского фундамента (микроконтинент), залегающий среди палеозойских (O–D) океанических и островодужных комплексов. Ильмено-Вишневогорский комплекс простирается с севера на юг более чем на 150 км с максимальной шириной 4–6 км и состоит из двух карбонатитосодержащих миаскитовых плутонов (20–25 × 6 км) – Вишневогорского и Ильменогорского, соединенных Центральной щелочной полосой, сложенной фенитами, жильными миаскитами, силикокарбонатитами и карбонатитами (рис. 1). Щелочные нефелин-микроклиновые и сиенитовые биотит-микроклиновые, эгирин-авгит-микроклиновые пегматиты развиты внутри и по периферии миаскитовых массивов.

В составе миаскитовых массивов ранние карбонатиты (севиты I) представлены массивными и брекчиевидными разновидностями кальцитового состава, содержащими автолиты – перемещенные округлые включения миаскитов и миаскит-пег-

* vladi49@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7952-0639>

** pribavkins@gmail.com

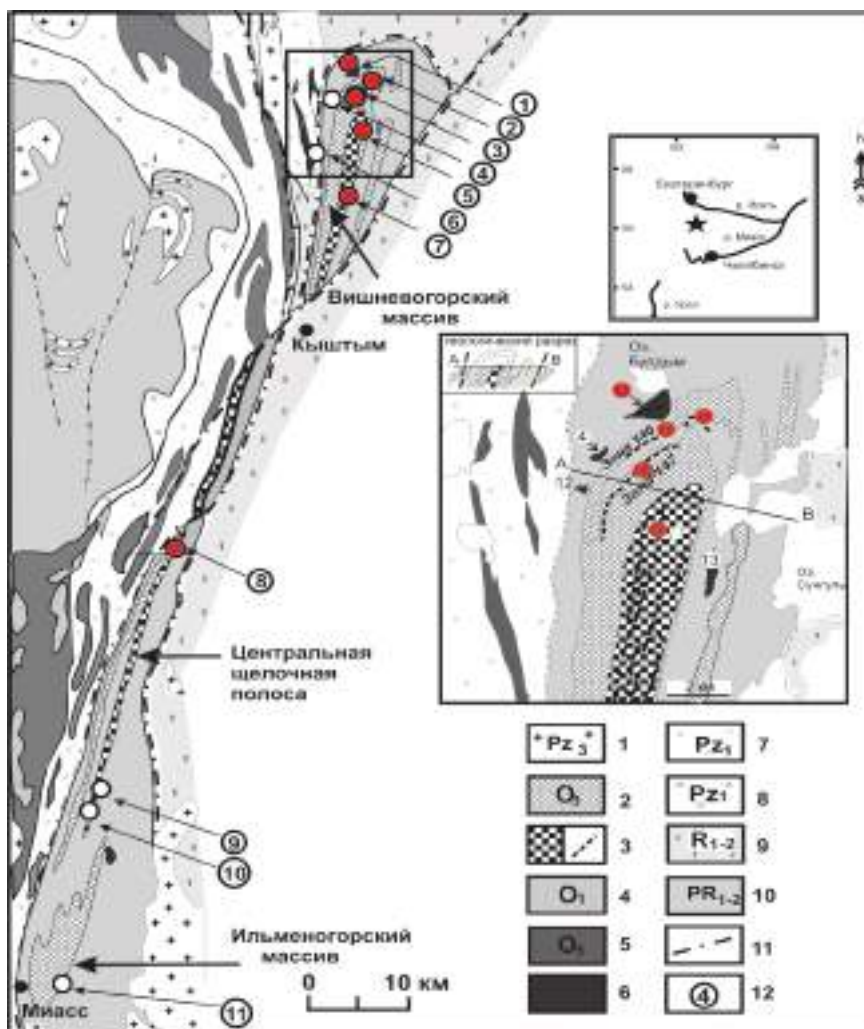


Рисунок 1. Схема геологического строения Ильмено-Вишневогорского и Булдымского карбонатитовых комплексов Южного Урала с основными месторождениями и рудопроявлениями Nb, Zr и PЗЭ (по материалам [6, 28]). 1 – граниты (Pz_3); 2, 3 – Ильмено-Вишневогорский комплекс (O_3); 2 – миаскиты Вишневогорского и Ильменогорского массивов, 3 – зоны метасоматитов, карбонатитов, силикатно-карбонатных пород Центральной щелочной полосы; 4 – габбро офиолитовой формации (O_1); 5 – гипербазиты офиолитовой формации (O_1); 6 – метультрабазиты Булдымского комплекса ($PR_?$); 7 – вулканогенно-осадочные образования Тагило-Магнитогорского мегаинклинория (Pz_1); 8 – сланцы гранато-сланцевые и эклогиты восточной периферии Уфалейского срединного массива (Pz_1); 9 – плагиосланцы и кварциты обрамления Сысертско-Ильменогорского срединного массива (R_{1-2}); 10 – плагиogneиссы, гранитные мигматиты, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты Сысертско-Ильменогорского и Уфалейского срединных массивов (PR_{1-2}); 11 – тектонические разломы и несогласия; 12 – основные месторождения и рудопроявления Nb и PЗЭ, связанные с карбонатитами (цифры в кружках): 1 – Булдымское (Nb и PЗЭ), 2, 3 – Вишневогорское – Nb (2 – зона 125; 3 – зона 140, 3а – 147), 4 – Спирихинское (PЗЭ), 5 – Светлинское (Nb), 6 – Каганское (PЗЭ), 7 – Потанинское (Nb), 8 – Увильдинское (Nb), 9 – Байдашевское (Nb), 10 – Ишкульское (Nb), 11 – Ильменское, копь 97 (Nb и PЗЭ), 12 – Халдихинское, 13 – Сунгульское. Залитые красным кружки – точки опробования.

Figure 1. Scheme of the geological structure of the Ilmeno-Vishnevogorsk and Buldym carbonatite complexes in the South Urals with the main deposits and ore occurrences of Nb, Zr and REE (based on materials [6, 28]). 1 – granites (Pz_3); 2, 3 – Ilmeno-Vishnevogorsk complex (O_3); 2 – miaskites of the Vishnevogorsk and Ilmenogorsk massifs, 3 – zones of metasomatites, carbonatites, silicate-carbonate rocks of the Central alkaline strip; 4 – gabbro of the ophiolite formation (O_1); 5 – hyperbasites of the ophiolite formation (O_1); 6 – meta-ultrabasites of the Buldym complex ($PR_?$); 7 – volcanic-sedimentary formations of the Tagil-Magnitogorsk megasynclinorium (Pz_1); 8 – schist garnet-mica and eclogites of the eastern periphery of the Ufaleysky middle massif (Pz_1); 9 – plagioclades and quartzites of the framing of the Sysert-Ilmenogorsk middle massif (R_{1-2}); 10 – plagiogneisses, granite migmatites, crystalline schists, amphibolites, quartzites of the Sysert-Ilmenogorsk and Ufaleysky middle massifs (PR_{1-2}); 11 – tectonic faults and disagreements; 12 – the main deposits and ore occurrences of Nb and REE associated with carbonatites (figures in circles): 1 – Buldymskoye (Nb and REE), 2, 3 – Vishnevogorsk - Nb (2 - zone 125; 3 - zone 140, 3a - 147), 4 – Spirikhinsky (REE), 5 – Svetlinsky (Nb), 6 – Kagan (REE), 7 – Potaninsky (Nb), 8 – Uvildinsky (Nb), 9 – Baidashevsky (Nb), 10 – Ishkulsky (Nb), 11 – Ilmensky, mine 97 (Nb and REE), 12 – Khaldikhinsky, 13 – Sungulsky. Red circles – points for testing.

матитов и минералы миаскитов (нефелин, полевые шпаты, биотит), а также акцессорные черный (гагчеттолит) и краснобурый пироклор, циркон, ильменит, апатит, магнетит, пирротин, пирит. Поздние карбонатиты (севиты II) образуют гнезда и жилы в телах ранних карбонатитов и нефелиновых сиенитах, а также образуют штокверки и жильные тела выполнения в экзоконтактовых фенитовых ореолах миаскитовых интрузивов. Поздние карбонатиты – крупнозернистые, с крупными (до 10–20 см) кристаллами биотита, апатита, пироклора, акцессорным ильменитом, пирротинном, пиритом.

Наиболее крупное Вишневогорское месторождение пироклора приурочено к северному замыканию одноименного массива миаскитов. Оно представляет собой три рудные зоны развития пироклорсодержащих карбонатитов и миаскит-пегматитов. Первая рудная зона (или зона 147) имеет протяженность 4 км и ширину 30 м. Она сложена пластообразными и жильными телами карбонатитов мощностью до 10 м и протяженностью в сотни метров в эндоконтакте миаскитового массива.

Вторая рудная зона (зона 140) приурочена к северному сателлитному телу миаскитов («седловидной залежи»), залегающему в 50 м к северу от Вишневогорского массива, и сложена системой субпараллельных жил карбонатитов, альбититов и миаскитовых пегматоидов. Третья рудная зона (зона 125) расположена в фенитовом ореоле Вишневогорского интрузива среди фенитизированных пород вишневогорской гнейс-амфиболитовой свиты, образуя штокверки и жильные тела выполнения.

Второе по значимости Потанинское месторождение пирохлора расположено в Центральной щелочной полосе (рис. 1). Оно представляет собой линейную, иногда штокверковидную, зону карбонатитов в миаскитах и фенитах протяженностью около 15 км и мощностью до 40 м. Кроме того, здесь известны другие сходные по строению рудопроявления Ишульское, Байдашевское, Увильдинское и Светлоозерское [6].

В состав Булдымского ультрабазит-карбонатитового комплекса входят Булдымский, Спирихинский, Халдихинский массивы. Они сложены метадуниитами, метаоливинитами, оливин-энстатитовыми породами с линейными зонами щелочных метасоматитов и карбонатитов, содержащих REE-Nb-минерализацию. Массивы ультрабазитов с карбонатитами залегают в обрамлении Вишневогорского и Ильменогорского миаскитовых интрузивов среди докембрийских пород вишневогорской и ильменогорской свит (PR₁) [6, 8]. Особенно широко карбонатиты развиты в Булдымском ультрабазитовом массиве, который образует линзовидное тело размером 1,5 × 1 км и залегает в 100 м к северу от седловидной залежи Вишневогорского массива миаскитов (рис. 1).

Наиболее крупное Булдымское Nb-TR-месторождение связано с карбонатитами и щелочными метасоматитами, приуроченными к системе разломов субширотного простирания в одноименном массиве ультрабазитов. Карбонатиты образуют зоны развития жил протяженностью в сотни метров и сопровождаются мощными карбонат-флогопит-рихтеритовыми, флогопит-рихтеритовыми и флогопитовыми метасоматитами (апогипербазитовые фениты), также несущими редкометалльно-редкоземельную минерализацию. Суммарная мощность зон карбонатитов и сопровождающих их метасоматитов достигает 50 м. Среди карбонатитов выделяются доломит-кальцитовые карбонатиты (севиты III) и доломитовые (бефорситы IV). Первые содержат тетраферрифлогопит, фторрихтерит и акцессорные пирохлор, циркон, магнетит, ильменит, пирротин, пирит. Вторые содержат редкоземельную минерализацию, представленную монацитом-(Ce), эшинитом-(Ce), U-пирохлором, REE-пирохлором, колумбитом, ортитом-(Ce), хромчешкинитом, молибденитом [6, 8].

Помимо Булдымского месторождения с ультрабазит-карбонатитовым комплексом связано Спирихинское месторождение редких земель в одноименном массиве ультрабазитов, а также Халдихинское и Ильменское Nb-REE рудопроявления (рис. 1). В наиболее изученном Ильменском рудопроявлении (Копь 97), расположенном к востоку от Ильменогорского массива миаскитов и залегающем среди ультрабазитов восточного крыла ильменогорской антиклинали, установлены монацит-(Ce), торит, эшинит-(Ce), фергусонит-(Ce), бастнезит-(Ce), хромистый давидит-(Ce), ортит-(Ce), ильменорутил, хромагнезиоцешкинит-(Ce) [9].

Методы и материалы исследования

Нами изучены коллекции рудных ниобиевых минералов группы пирохлора из редкометалльных месторождений и рудопроявлений Ильмено-Вишневогорского комплекса (Вишневогорское, Потанинское месторождения; рудопроявления Увильдинское, Пургино) и Булдымского комплекса (Булдымское месторождение), переданные нам первооткрывателем этих месторождений В. Я. Левиным, а также авторские коллекции рудных минералов. Всего исследовано 20 образцов и около 200 зерен минералов группы пирохлора из основных типов пород и руд.

Внутреннее строение и состав минералов группы пирохлора предварительно были исследованы на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы Jeol с ЭДС приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы OxfordInstruments в Центре коллективного пользования УрО РАН «Геоаналитик», г. Екатеринбург (аналитик И. А. Готтман). Условия съемки: ускоряющее напряжение 20–25 кВ и зондовый ток 1 нА, низкий вакуум 60–80 Па.

Прецизионное определение химического состава пирохлоров выполнено на электронном микрозонде «CAMEBAX-micro» в ИГМ СО РАН, Новосибирск (аналитик В. В. Шарьгин) и на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100 в ЦКП «Геоаналитик» (аналитик Д. А. Замятин). В качестве стандартов использовались: апатит (для анализа содержания F, P), жадеит (Na), родонит (Mn), CaSiO₃ (Ca, Si), TiO₂ (Ti), Fe₂O₃ (Fe), ThO₂ (Th), UO₂ (U), PbSO₄ (Pb), металлический Nb (Nb), Ta₂O₅ (Ta), SrSO₄ (Sr), BaSO₄ (Ba) алюмосиликатные стекла, легированные PЗЭ (La, Ce, Y). Анализ пирохлоров проводился при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронного зонда 20 нА с использованием кристалл-анализаторов TAP, LPCO, LPET, PET, LIF. Время накопления импульсов в максимуме пика выбрано от 10 до 30 с. Пределы обнаружения F, Na, Si, P, Ca, Sr, Y, Th составили 0,02–0,1 мас. %; Ti, Mn, Fe, Ba, La, U – 0,1–0,2 мас. %; Nb, Ce – 0,2–0,3 мас. %; Pb – 0,3–0,4 мас. %; Ta – 0,6–0,7 мас. %.

В Ильмено-Вишневогорском комплексе изучены образцы пирохлоров из разновозрастных и разнофациальных карбонатитов – силикокарбонатитов, включая 3 образца ранних карбонатитов (севиты I) и 8 образцов поздних карбонатитов (севиты II). Также изучены 1 образец из пегматоидного миаскита, 3 образца из миаскит-пегматита и 3 образца из пироксен-полевошпатовых жил фенитового ореола. В Булдымском комплексе изучены пирохлоры ранних доломит-кальцитовых карбонатитов (севитов III), а также 2 образца слюдистых метасоматитов. Представительные анализы разновидностей минералов группы пирохлора приведены в таблице.

В миаскитах Ильмено-Вишневогорского комплекса пирохлор представлен октаэдрическим кристаллами темно-бурого, иногда оранжевого цвета размером 0,01–0,1 мм. В пегматоидных разновидностях миаскитов размеры пирохлора увеличиваются до 0,5 см, а в пегматитах – до нескольких сантиметров. В миаскит-пегматитах наиболее часто встречаются красновато-бурые и темно-коричневые кристаллы, реже желтовато-бурые и темно-красные, иногда проявлена ростовая зональность с чередованием темноокрашенных и светлых зон.

В силикокарбонатитах (меланократовых карбонатно-силикатных породах) и в ранних карбонатитах (севитах I) месторождений и рудопроявлений Центральной щелочной полосы (Потанинское месторождение, Увильдинское рудопроявление) пирохлор встречается в виде мелких кристаллов и округлых зерен черного и зеленовато-черного цвета и представлен U-(Ta)-содержащей разновидностью (уранпирохлором). Поверхность зерен уранпирохлоров часто имеет сферические каверны, вероятно, представляющие собой области разрушения от пробега альфа-частиц в результате радиоактивного

распада U и Th (рис. 2, а). Часто зерна и кристаллы уранипирохлора с краев и по системам трещин подверглись вторичным изменениям различной степени с образованием концентрических текстур и трещин разбухания (рис. 2, б).

В ранних карбонатитах (севидах I) Центральной щелочной полосы также встречаются зерна пирохлора темно-бу-рого цвета, содержащие мультифазные включения (апатит, кальцит, калишпат, хлорит, титангематит), которые могут являться результатом захвата пирохлором богатого CO₂ и H₂O расплава (рис. 2, в). Уникальной особенностью уранип-

Представительные химические составы (мас. %) и формулы (форм. ед.) минералов группы пирохлора из пород и руд редкометалльных месторождений карбонатитовых комплексов Урала.

Representative chemical compositions (wt. %) and formulas (units) of pyrochlore group minerals from rocks and ores of rare-metal deposits of the Ural carbonatite complexes.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Образец	748-10	К-37-95	К2-18	Дол-21	Кrv5-2	43-62	85-727	ЛК-147
Точки анализа	2	2с	1	5	2r	3	3	12
Nb ₂ O ₅	42,56	38,72	46,29	63,93	62,59	61,66	67,99	65,94
Ta ₂ O ₅	5,88	4,02	0,84	2,97	1,92	3,53	0,00	0,00
TiO ₂	11,03	12,50	8,52	4,28	4,08	4,89	3,73	4,16
ZrO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04
UO ₂	21,25	22,11	17,57	0,00	1,71	1,80	0,00	0,06
ThO ₂	0,05	0,78	0,69	0,53	0,35	1,59	0,27	0,26
Fe ₂ O ₃	0,10	0,00	1,54	0,08	0,00	0,07	0,11	0,00
Y ₂ O ₃	0,00	0,12	0,11	Н/о	0,01	Н/о	Н/о	0,03
La ₂ O ₃	0,00	0,31	0,18	0,56	0,01	0,22	0,24	0,13
Ce ₂ O ₃	0,06	0,72	0,40	1,35	0,08	0,82	0,57	0,22
Nd ₂ O ₃	0,00	0,94	0,84	0,40	0,12	0,26	0,10	0,07
MnO	0,00	0,00	0,11	Н/о	0,01	Н/о	Н/о	0,00
MgO	0,00	0,03	0,03	Н/о	0,00	Н/о	Н/о	Н/о
CaO	11,77	11,26	13,91	14,91	16,10	15,47	15,94	16,54
BaO	0,00	0,00	0,00	Н/о	0,43	Н/о	Н/о	0,00
SrO	0,17	0,28	0,17	0,68	0,72	0,39	0,29	0,71
PbO	0,00	0,91	0,95	н,о	0,22	Н/о	Н/о	0,01
Na ₂ O	4,96	5,51	4,88	6,93	7,25	6,51	7,20	7,46
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	Н/о	0,01	Н/о	Н/о	0,02
F	1,70	1,44	1,99	5,14	5,10	4,74	5,36	5,26
O=F ₂	0,72	0,61	0,84	2,16	2,15	2,00	2,26	2,21
Total	98,81	99,81	98,80	99,60	98,58	99,95	99,54	98,81
Позиция В								
Nb	1,317	1,250	1,455	1,752	1,773	1,712	1,828	1,809
Ta	0,109	0,078	0,016	0,049	0,033	0,059	0,000	0,000
Ti	0,568	0,672	0,445	0,195	0,192	0,226	0,167	0,190
Fe3+	0,005	0,000	0,081	0,004	0,000	0,003	0,005	0,000
Sum B	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Позиция А								
Ca	0,863	0,862	1,036	0,968	1,081	1,018	1,016	1,075
Mn	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000
Sr	0,007	0,011	0,007	0,024	0,026	0,014	0,010	0,025
Pb	0,000	0,018	0,018	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
Na	0,658	0,763	0,657	0,815	0,881	0,775	0,830	0,878
K	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001
Y	0,000	0,004	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
LREE	0,002	0,051	0,036	0,051	0,005	0,029	0,020	0,009
U	0,324	0,351	0,272	0,000	0,024	0,025	0,000	0,001
Th	0,001	0,013	0,011	0,007	0,005	0,022	0,004	0,004
Sum A	1,855	2,077	2,050	1,866	2,037	1,883	1,880	1,994
A-deficit	0,145	-0,077	-0,050	0,134	-0,037	0,117	0,120	0,006
F	0,368	0,325	0,438	0,986	1,011	0,921	1,008	1,047

Продолжение таблицы

№ п/п	9	10	11	12	13	14	15	16
Образец	3296	92	92	КК-2	Дол-7	331* ядро	331* ядро_изм	331* кайма
Точки анализа	3	10с	10г	9г	3	6-1с	6-2с_alt	6-3г
Nb ₂ O ₅	66,95	60,59	60,17	62,47	67,14	60,33	52,08	59,26
Ta ₂ O ₅	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00
TiO ₂	2,96	6,80	6,64	5,21	3,52	4,45	4,42	3,51
ZrO ₂	0,09	0,00	0,09	0,00	0,00	1,58	0,00	0,00
UO ₂	0,00	0,45	0,52	0,04	0,09	3,72	3,72	0,85
ThO ₂	0,51	0,75	0,88	0,98	0,41	0,3	0,53	0,59
Fe ₂ O ₃	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	1,52	1,69	1,5
Y ₂ O ₃	0,00	0,09	0,03	Н/о	Н/о	0,1	0	0,03
La ₂ O ₃	0,05	0,85	0,95	2,08	0,65	0,37	0,7	1,08
Ce ₂ O ₃	0,20	1,99	2,49	4,13	1,33	1,52	2,42	2,98
Nd ₂ O ₃	0,06	0,63	0,81	1,13	0,23	Н/о	Н/о	Н/о
MnO	0,01	0,01	0,04	Н/о	Н/о	0,21	0,42	0,5
MgO	Н/о	0,00	0,00	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о
CaO	16,21	14,68	13,77	11,33	13,74	11,7	6,04	12,24
BaO	0,00	0,00	0,00	Н/о	Н/о	0,77	2,39	0,73
SrO	0,67	0,99	1,03	1,08	2,15	1,97	5,01	3,27
PbO	0,04	0,02	0,11	Н/о	Н/о	0,48	0,31	0,05
Na ₂ O	7,50	7,29	7,34	7,72	7,37	3,64	0,05	2,09
K ₂ O	0,01	0,01	0,02	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о
F	5,03	5,62	5,55	5,16	5,20	2,76	0,24	2,13
O=F ₂	2,12	2,37	2,34	2,17	2,19	1,16	0,10	0,90
Total	98,19	98,74	98,45	99,15	99,64	95,71	80,02	90,81
Позиция В								
Nb	1,859	1,686	1,687	1,756	1,840	1,850	1,632	1,593
Ta	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,002
Ti	0,136	0,314	0,309	0,244	0,160	0,149	0,200	0,177
Fe3+	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,068	0,034
Sum B	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Позиция А								
Ca	1,066	0,968	0,915	0,755	0,892	0,864	0,460	0,738
Mn	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000	0,002	0,011	0,075
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Н/о	0,015
Sr	0,024	0,035	0,037	0,039	0,076	0,064	0,018	0,143
Pb	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,008	0,068	0,006
Na	0,893	0,869	0,882	0,931	0,866	0,795	0,008	0,216
K	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,422	0,000
Y	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
LREE	0,007	0,078	0,096	0,167	0,049	0,059	0,003	0,107
U	0,000	0,006	0,007	0,000	0,001	0,003	0,0415	0,005
Th	0,007	0,010	0,012	0,014	0,006	0,006	0,050	0,010
Sum A	2,000	1,971	1,956	1,906	1,890	1,806	0,004	1,316
A-deficit	0,000	0,029	0,044	0,094	0,110	0,194	1,374	0,684
F	0,977	1,094	1,089	1,015	0,997	0,813	0,522	0,353

The chemical composition of the pyrochlore was determined using a CAMEBAX microprobe at 60 nA and 20 kV, the probe beam size was 2 μm (IGM SB RAS, Novosibirsk, analyst VV Sharygin); 14–16 - with a Cameca-100 microprobe (IGG UB RAS, analyst is D. V. Zamyatin); 1–3 – U–(Ta) – containing oxycalcio-pyrochlore: 1 – from silicate-carbonate rocks (Uvidinsky ore occurrence, CSCP), 2 – from Sevites I (Potaninsky deposit); 3 – from micas (Buldym field); 4–6 – Ta-containing fluoro-calcium-pyrochlore: 4–5 – from Ne-pegmatites (Vishnevogorsk deposit), 4 – zone 147, 5 – vein No 5, Karavai; 6 – from Sevites I (Potaninsky deposit); 7–9 – fluorcalcio-pyrochlore: 7 – from pegmatoid miaskites (ore zone 140), 8 – from Sevites I (ore zone 147, Vishnevogorsk deposit); 9 – from Sevites III, Buldym field; 10–12 – REE–(Sr)–containing fluoro-calcium-pyrochlore: 10–11 – from Sevit II, Potaninsky ore deposit, 12 – from Sevit II, Uvidinsky ore occurrence; 13 – from Sevit II (ore zone 147, Vishnevogorsk deposit); 14–16 – Sr–(REE)–containing hydro-pyrochlore with relic nuclei of U-containing pyrochlore: 15, 16 – grain core, 16 – grain edge.

Химический состав пироксенов определен на микрозонде CAMEBAX при 60 нА и 20 кВ, размер пучка зонда – 2 μm (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, аналитик В. В. Шарыгин); 14–16 – на микрозонде Cameca-100 (ИГГ УрО РАН, аналитик Д. В. Замятин); 1–3 – U–(Ta)–содержащие оксикальциопироксены: 1 – из силикатно-карбонатных пород (Увидинское рудопоявление, ЦШП), 2 – из севитов I (Потанинское месторождение); 3 – из слюдитов (Булдымское месторождение); 4–6 – Ta–содержащие фторкальциопироксены: 4–5 – из Ne-пегматитов (Вишневогорское месторождение), 4 – зона 147, 5 – жила № 5, Каравай; 6 – из севитов I (Потанинское месторождение); 7–9 – фторкальциопироксены: 7 – из пегматоидных миаскитов (рудная зона 140.), 8 – из севитов I (рудная зона 147, Вишневогорское месторождение); 9 – из севитов III, Булдымское месторождение; 10–12 – REE–(Sr)–содержащие фторкальциопироксены: 10–11 – из севитов II, Потанинское месторождение, 12 – из севитов II, Увидинское рудопоявление; 13 – из севитов II (рудная зона 147, Вишневогорское месторождение); 14–16 – Sr–(REE)–содержащий гидрорироксоло с реликтивными ядрами U–содержащего пироксена: 15, 16 – ядро зерна, 16 – край зерна.

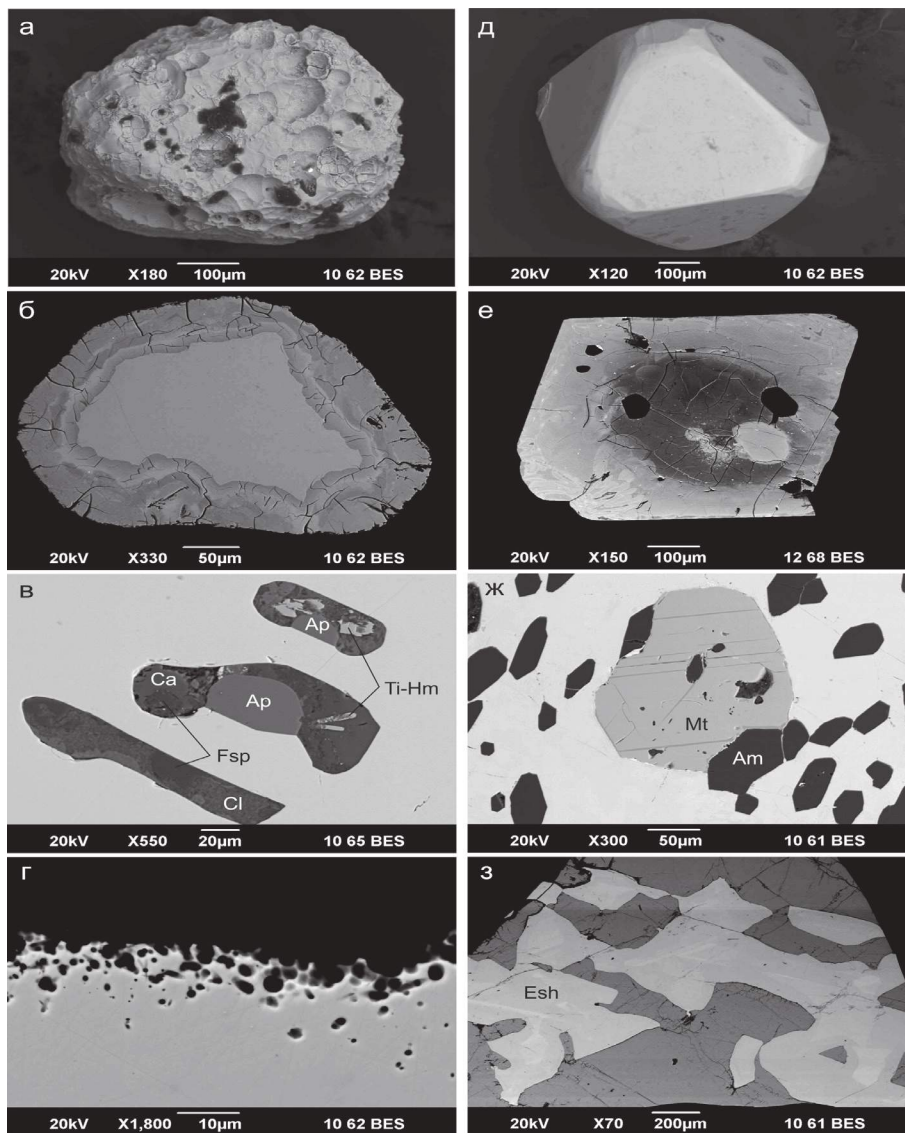


Рисунок 2. Морфология и особенности внутреннего строения кристаллов пирохлора. Ильмено-Вишневогорский комплекс: а–в – пирохлоры ранней карбонатитовой стадии, Потанинское месторождение: а – зерно U–(Ta)-пирохлора со сферическими кавернами (севит I); б – внутренне строение гидратированного U–(Ta)-пирохлора (севит I); гидратация пирохлора с краев вызывает образование концентрических текстур и сопровождается трещинами разбухания; в – многофазные включения в зерне фторкальциопирохлора из севита I; г–е – пирохлоры позднекарбонатитовой стадии: г – (REE–Sr)-пирохлор, содержащий в краевой части пузыри, севит II, Потанинское месторождение, д – кубооктаэдрический кристалл (Sr–REE)-пирохлора, севит II, Вишневогорское месторождение; е – внутреннее строение кристалла пирохлора: реликтовое ядро, сложенное гидратированным U-содержащим пирохлором (темно-серое в BSE), окаймленное (Sr–REE)-пирохлором (светло-серое в BSE), Вишневогорское месторождение; Булдымский комплекс: ж – кристаллы пирохлора с многочисленными включениями амфибола (фторрихтерита) и магнетита из флогопит-рихтеритовых метасоматитов, з – REE–Th-пирохлор в сростании с эшинитом из слюдястых метасоматитов, Булдымское месторождение; Am – амфибол, Mt – магнетит, Ti–Hm – титан–гематит, Ca – кальцит, Ap – апатит, Cl – хлорит, Esh – эшинит.

Figure 2. Morphology and features of the internal structure of pyrochlore crystals. Ilmenov-Vishnevogorsk complex: а–в – pyrochlore of the early carbonatite stage, Potaninskoe deposit: а – grain of U–(Ta) pyrochlore with spherical caverns (sevit I); б – the internal structure of hydrated U–(Ta) pyrochlore (Sevit I); hydration of pyrochlore from the edges causes the formation of concentric textures and is accompanied by swelling cracks; в – multiphase inclusions in the grain of fluorocalciopyrochlore from Sevit I; г–е – pyrochlore of the late carbonate stage: г – (REE–Sr) pyrochlore containing bubbles in the marginal part, sevit II, Potaninskoe deposit, д – cuboctahedral crystal (Sr – REE) pyrochlore, sevit II, Vishnevogorsk deposit; е is the internal structure of the pyrochlore crystal: a relict core composed of hydrated U-containing pyrochlore (dark gray in BSE), bordered by (Sr – REE) pyrochlore (light gray in BSE), Vishnevogorsk deposit; Buldymsk complex: ж – crystals of pyrochlore with numerous inclusions of amphibole (fluorichterite) and magnetite from phlogopite-richterite metasomatites, з – REE – Th-pyrochlore in intergrowth with eschinitis from mica metasomatites, Buldymsk deposit; Am – amphibole, Mt – magnetite, Ti–Hm – titanium–hematite, Ca – calcite, Ap – apatite, Cl – chlorite, Esh – eschinitite.

рохлоров и пирохлоров Центральной щелочной полосы являются пустотелые сферы (пузыри) размерностью менее 10 мкм, фиксируемые как во внутренних, так и во внешних частях кристаллов (рис. 2, г). Возможно, это отражает специфику флюидонасыщенности расплава (высокую концентрацию летучих), из которых кристаллизовались пирохлоры, либо это были капли солей, не смешивающихся с карбонатным расплавом.

Пирохлоры поздних карбонатитов (севитов II) Вишневогорского и Потанинского месторождений образуют октаэдрические и кубооктаэдрические кристаллы размером 0,05–1,5 см красно-бурого, ярко-красного, желтого и оранжевого цвета (рис. 2, д). Часто встречаются кристаллы сложного внутреннего строения – с реликтовыми ядрами черного цвета,

сложенными гидратированным U-содержащим пирохлором, и обрастаниями новообразованного Sr-REE-содержащего ярко-красного пирохлора, что может быть связано с его образованием при процессах растворения-перееотложения ранних генераций пирохлора под воздействием флюида на поздних стадиях рудообразования (рис. 2, е).

В доломит-кальцитовых карбонатитах (севитах III) Булдымского комплекса пирохлор образует красно-бурые кристаллы и зерна размером 0,5–10 см. В ассоциирующих флогопит-рихтеритовых метасоматитах также встречается мелкая вкрапленность желто-бурого пирохлора (метакристаллы?) с многочисленными включениями амфибола (фторрихтерита), рис. 2, ж, а в слюдитых отмечается уранипирохлор (округлые зерна черного цвета с зеленовато-черными каймами размером 0,1–0,5 см) и темно-бурый REE-Th-пирохлор, образующий крупные кристаллы (до 15 см) в сростании кристаллами эшинита -(Ce) (рис. 2, з).

Особенности химизма и эволюция состава пирохлоров

Представительные анализы минералов группы пирохлора Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов приведены в таблице. Изменчивость в химическом составе исследованных пирохлоров значительна (в мас. %): Nb₂O₅ – 39,0–69,6; Ta₂O₅ – 0–13,8; ZrO₂ – 0–0,15; TiO₂ – 2,8–12,2; CaO – 2,6–17,2; Na₂O – 0–8,0; ThO₂ – 0–6; UO₂ – 0–23,8; LREE₂O₃ – 0–7,3; Fe₂O₃ – 0–1,8; MnO – 0–0,7; BaO – 0–2,3; SrO – 0,1–5,5; PbO – 0–1,0; F – 0–5,7, что характерно для пирохлоров из карбонатитовых массивов мира [10–17].

Согласно последней номенклатуре группы пирохлора (на основе преобладающего катиона или аниона в позициях B = Nb, Ti, Ta; A = Ca, Na, REE, Y, Sr, Ba, Mn, Mg, U, Th и Y = O, OH, F) [18], исследованные пирохлоры могут быть классифицированы как U-(Ta)-содержащие оксикальциопирохлоры (уранпирохлоры, по классификации [19]), а также фторкальциопирохлоры (в том числе Ta-, REE_{Cc}- и Sr-содержащие разновидности). Измененные пирохлоры образуют тренд к гидроксилкальциопирохлорам, кено- и гидропирохлорам. Составы пирохлоров в соответствии с классификациями [18, 19] показаны на рис. 3.

U-(Ta)-содержащие гидроксил- и оксикальциопирохлоры (15–24 мас. % UO₂; 1–14 мас. % Ta₂O₅) встречаются в ранних высокотемпературных карбонатитах и силикокарбонатитах Центральной щелочной полосы (Потанинское месторождение, Увильдинское рудопроявление). Этот тип пирохлоров, вероятно, образуется раньше, чем другие типы пирохлоров, на завершающих стадиях эволюциищелочно-карбонатитовых магм [6].

Ta-содержащие фторкальциопирохлоры (1,5–5,0 мас. % Ta₂O₅; 0–4,2 мас. % UO₂) характерны для нефелиновых пегматитов [7] и установлены в апикальной части Вишневогорского массива (Вишневогорское месторождение, рудная зона 147 и 140), а также в ранних карбонатитах на Потанинском месторождении. Этот пирохлор формируется на пегматитовой стадии кристаллизации щелочного расплава.

Фторкальциопирохлоры с максимальными содержаниями Nb₂O₅ (65–69 мас. %) и низкими содержаниями микропримесей встречаются в миаскитовых пегматоидах и карбонатитах Вишневогорского массива, а также в кальцит-доломитовых карбонатитах Булдымского комплекса. Этими пирохлорами сложены основные рудные зоны Вишневогорского (рудные зоны 140 и 147) и Булдымского месторождений, встречаются они также и на Потанинском месторождении.

Sr- и REE-содержащие фторкальциопирохлоры (3–6 мас. % LREE₂O₃; 1,5–4,5 мас. % SrO) формируются в поздних карбонатитах Вишневогорского массива, а также в пироксен-полевошпатовых жилах и карбонатитах экзоконтактового фенитового ореола Вишневогорского массива и Центральной щелочной полосы. Встречаются в виде самостоятельных кристаллов (рис. 2, д), иногда образуют каймы вокруг U-содержащих реликтовых ядер пирохлора (рис. 2, е). REE-Th-содержащие фторкальциопирохлоры (3–4,5 мас. % LREE₂O₃; 5,9–8,0 мас. % ThO₂) в сростании с эшинитом установлены в слюдитых метасоматитах Булдымского массива. Вероятно, что формирование этих разновидностей пирохлоров про-

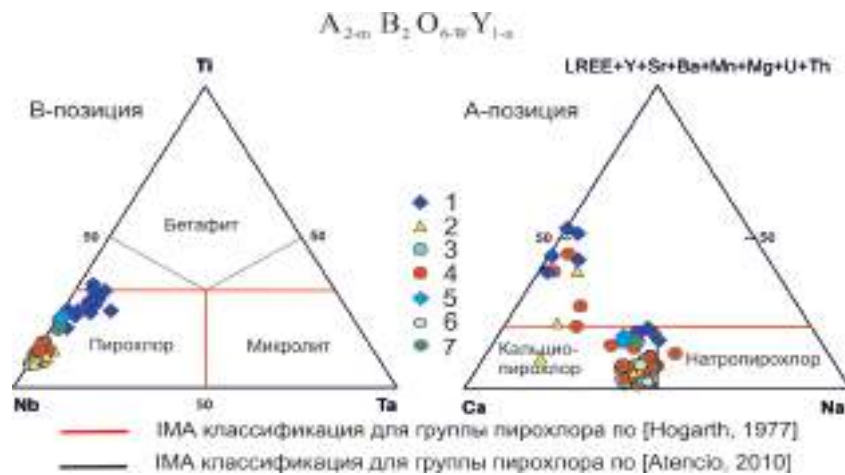


Рисунок 3. Составы пирохлоров на треугольных диаграммах, отражающих заполнение В- и А- позиций (форм. ед.) в структуре пирохлора в соответствии с IMA классификациями [18, 19]. IMA (International Mineralogical Association) – Международная минералогическая ассоциация. 1–4 –Ильмено-Вишневогорский комплекс: 1 – U-(Ta)-содержащие окси- и гидроксилкальциопирохлоры (севиты I), 2 – (Ta)-содержащие фторкальциопирохлоры (миаскит-пегматиты), 3 – фторкальциопирохлоры (севиты I), 4 – (REE–Sr)-содержащие фторкальциопирохлоры (севиты II); 5–7 –Булдымский комплекс: 5 – U-(Ta)-содержащие гидроксилкальциопирохлоры (слюдиты), 6 – фторкальциопирохлоры (севиты III), 7 – (REE–Th)-содержащие пирохлоры (слюдиты).

Figure 3. Compositions of pyrochlore in triangular diagrams reflecting the filling of B- and A- positions (form units) in the structure of pyrochlore in accordance with IMA classifications [18, 19]. IMA – International Mineralogical Association. 1–4 –Ilmen-Vishnevogorsky complex: 1 – U-(Ta)-containing hydroxy- and hydroxyl-calcium-pyrochlore (Sevites I), 2 – (Ta)-containing fluoro-calcium-pyrochlores (Miaskite-pegmatites), 3 – Fluoro-calcium-pyrochlore, 4 – Sevites (4)– (REE – Sr) – containing fluoro-calcium-pyrochlore (Sevita II); 5–7 – Buldym complex: 5 – U – (Ta) – containing hydroxylcalcio-pyrochlore (micas), 6 – fluorocalcipo-pyrochlors (sevite III), 7 – (REE – Th) – containing pyrochlores (micaceous).

исходит на завершающих стадиях (позднекарбонатитовой) эволюции комплекса, а также может быть связано с этапом метаморфических преобразований коллизионной стадии.

Составы пироксолов из различных типов пород Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов приведены на бинарной диаграмме Nb–F, иллюстрирующей последовательность формирования рудных минералов и закономерности их геохимической эволюции (рис. 4).

Тренд I (раннекарбонатитовый тренд) иллюстрирует последовательное изменение составов уранпироксолов (или U–(Ta)-содержащего оксикальциопироксолов по [18]) с увеличением F и Nb, после чего происходит резкая смена составов кристаллизующихся рудных минералов и начинают кристаллизоваться фторкальциопироксолов, формирующие тренд II (позднекарбонатитовый тренд), который фиксирует резкую смену условий и химизма среды минералообразования. Тренд III отражает процессы вторичных изменений пироксолов, связанных с воздействием водного флюида, в результате которых происходит вынос Na, Ca и F из структуры пироксолов, появление вакансий в А-позиции, которая частично заполняется Si, Fe, Ta, Ti, Th, REE и Sr с формированием составов гидроксил-, кено- и гидропироксолов.

Необходимо отметить, что химические составы изученных нами уранпироксолов из ранних карбонатитов Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов типичны для самых ранних генераций уранпироксолов, которые описаны в карбонатитовых комплексах Карело-Кольской провинции [10, 13] и образуются на фоскоритовой (позднемагматической) стадии эволюции этих карбонатитовых комплексов (рис. 4). Также можно отметить близость составов пироксолов миаскит-пегматитов Ильмено-Вишневогорского комплекса и пироксолов из фоскоритов Хибин. Эти данные в совокупности с геологическими и петрографическими наблюдениями подтверждают, что U–(Ta)-содержащие разновидности пироксолов уральских карбонатитовых комплексов образовались на позднемагматической стадии кристаллизации щелочно-карбонатитовых расплавов.

Пироксолов поздних карбонатитов и метасоматитов Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов показывают широкие вариации составов и формируют единый линейный тренд с увеличением F при менее значительных изменениях содержания Nb (рис. 4). Необходимо отметить, что составы изученных пироксолов отличны от ранних (первичных) пироксолов фоскоритов и карбонатитов Карело-Кольской провинции, что может быть связано с иными условиями их формирования на постколлизионном этапе развития Уральской складчатой области.

Таким образом, геохимические данные, полученные нами для U–(Ta)-содержащих пироксолов Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов типичны для позднемагматических (фоскоритовых) стадий эволюции карбонатитовых комплексов [10, 13]; это в совокупности с геологическими и петрографическими наблюдениями подтверждает, что U–(Ta)-пироксолов уральских карбонатитовых комплексов образовались на позднемагматической стадии кристаллизации щелочно-карбонатитовых расплавов. Пироксолов поздних карбонатитов (севитов II и севитов III), а также миас-

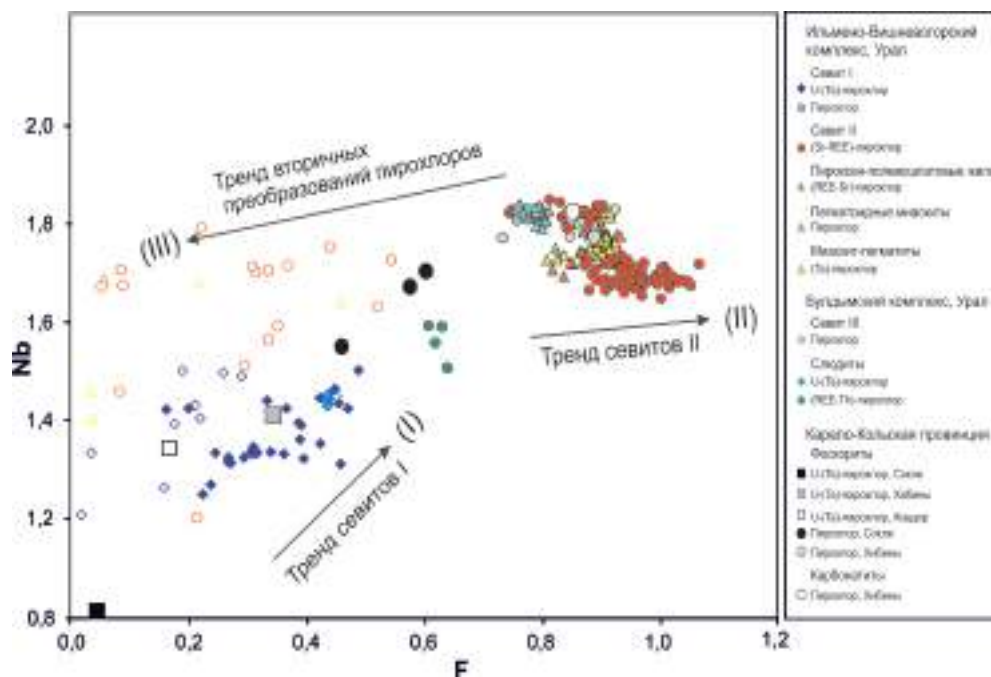


Рисунок 4. Бинарная диаграмма состава Nb–F (форм. ед.) минералов группы пироксолов из пород Ильмено-Вишневогорского и Булдымского карбонатитовых комплексов, Южный Урал. Стрелки показывают направление эволюции состава пироксолов: I – раннекарбонатитовый тренд, II – позднекарбонатитовый тренд, III – тренд низкотемпературных изменений (гидратации) с образованием составов кено- и гидропироксолов. Не залитые условные знаки – измененный (гидратированный) пироксолов; тренд I соответствует кристаллизации уранпироксолов (Потанинское и Булдымское месторождения); тренд II – кристаллизация фторкальциопироксолов (Вишневогорское, Булдымское, Потанинское месторождения); для сравнения также показаны точки состава пироксолов из пород платформенных ультраосновных щелочных карбонатитовых комплексов Карело-Кольской провинции [10, 13].

Figure 4. A binary composition of the diagram of Nb – F (units) of minerals of the pyrochlore group from rocks of the Ilmeny-Vishnevogorsk and Buldym carbonate complexes, South Ural. Arrows indicate the direction of evolution of the composition of pyrochlore: I – early carbonate trend, II – late carbonate trend, III – trend of low-temperature changes (hydration) with the formation of keno- and hydro-pyrochlore compositions. Not filled in conventional signs – altered (hydrated) pyrochlore; Trend I corresponds to the crystallization of uranpyrochlore (Potaninskoye and Buldym deposits) Trend II – crystallization of fluoro-calcium-pyrochlore (Vishnevogorsk, Buldym, Potaninsk deposits); for comparison, pyrochlore composition points from the rocks of platform ultrabasic alkaline carbonate complexes of the Karelian-Kola province are also shown [10, 13].

скит-пегматитов и пироксен-полевошпатовых жил Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов показывают широкие вариации составов (от стехиометричных пироксидов с низкими содержаниями микропримесей до Ta-, REE- и Sr-содержащих разновидностей пироксидов) и формируют линейный тренд с увеличением Na и F (рис. 4), свидетельствующий о резкой смене условий процессов кристаллизации и возможном перерыве в рудообразовании.

Необходимо отметить, что U–Pb-датирование пироксидов подтверждает многоэтапность формирования Nb-руд месторождений Ильмено-Вишневогорского и Булдымского карбонатитовых комплексов [20, 21]. Так, U–Pb-возраст U–(Ta)-пироксидов Потанинского месторождения ($378 \pm 4,9$ млн лет) может быть соотнесен с завершающей стадией функционирования щелочно-карбонатитовой магматической системы [20, 22–25]. U–Pb-возраст фторкальциопироксидов Вишневогорского и Булдымского месторождений ($230 \pm 1,5$ и 235 ± 6 млн лет соответственно), а также Потанинского месторождения ($217,2 \pm 1,9$ млн лет) [20] фиксирует новый этап рудообразования и, вероятно, связанный с постколлизийным этапом развития Уральской складчатой области [26, 27].

Заключение

В результате проведенных исследований рудных минералов группы пироксидов карбонатитовых комплексов Урала установлены несколько минеральных видов группы пироксидов, формирование которых связано с определенными эволюционными стадиями функционирования щелочно-карбонатитовой магматической системы и вторичными преобразованиями. Согласно [18], исследованные пироксиды могут быть классифицированы как фторкальциопироксиды (в том числе Ta-, REE_с- и Sr-содержащие разновидности) и U–(Ta)-оксикальциопироксиды (уранпироксиды, по классификации [20]). Среди измененных разновидностей пироксидов установлены составы гидроксикальциопироксидов, кенопироксидов и гидропироксидов.

U–(Ta)-оксикальциопироксиды образовались на позднемагматической (раннекарбонатитовой) стадии эволюции щелочно-карбонатитовых расплавов; фторкальциопироксиды (в том числе Ta-содержащие разновидности) формируются на пегматитовой и ранней карбонатитовой стадии кристаллизации. Образование Sr–REE-содержащих фторкальциопироксидов происходит на завершающей (позднекарбонатитовой) стадии эволюции комплекса, а также может быть связано с этапом метаморфических преобразований постколлизийной стадии. Вторичные изменения пироксидов, связанные с воздействием водного флюида, приводят к формированию составов гидроксикальциопироксидов, кено- и гидропироксидов. Закономерности эволюции химизма пироксидов – последовательное изменение составов уранпироксидов с увеличением F и Nb (раннекарбонатитовый тренд) и резкая смена состава кристаллизующихся фторкальциопироксидов (позднекарбонатитовый тренд) – фиксирует резкую смену условий и химизма среды минералообразования.

Рассмотренные особенности морфологии, состава и геохимической эволюции рудных минералов группы пироксидов редкометалльных карбонатитовых месторождений Урала свидетельствуют о двухэтапном процессе рудообразования. На первом этапе, связанном с заключительными стадиями эволюции щелочно-карбонатитовой магматической системы, в силикокарбонатитах (ранних карбонатитах) была сформирована U–(Ta)-пироксидовая минерализация. На втором этапе, связанном с метасоматическими или метаморфическими преобразованиями пород карбонатитовых комплексов, на постколлизийной стадии развития Уральской складчатой области происходили масштабные процессы растворения, переотложения рудных минералов первого этапа и формировались пироксиды нового поколения.

Авторы выражают глубокую признательность первооткрывателю редкометалльных месторождений карбонатитовых комплексов Урала В. Я. Левину за предоставленные коллекции редкометалльных минералов для исследований, а также своим коллегам В. В. Шарыгину и Д. В. Замятину за проведение аналитических работ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17–05–00154 и темы государственного задания ИГГ УрО РАН № АААА-А18_118052590028-9.

ЛИТЕРАТУРА

- Багдасаров Ю. А. О некоторых условиях образования карбонатитов линейно-трещинного типа // Литосфера. 2014. № 4. С. 113–119.
- Бонштедт-Куплетская Э. М. Минералогия щелочных пегматитов Вишневых гор. М.: АН СССР, 1951. 176 с.
- Еськова Е. М., Назаренко И. И. Пироксид Вишневых гор, его парагенетические ассоциации и особенности химического состава // Труды ИМГРЭ. 1960. № 4. С. 33–50.
- Еськова Е. М., Жабин А. Г., Мухитдинов Г. Н. Минералогия и геохимия редких элементов Вишневых гор. М.: Наука, 1964. 319 с.
- Ефимов А. Ф., Лебедева С. И., Левин В. Я. Типохимизм акцессорного пироксидов в породах щелочного комплекса Урала // Геохимия. 1985. № 2. С. 201–208.
- Левин В. Я., Роненсон Б. М., Самков В. С. и др. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 274 с.
- Попова В. И., Попов В. А., Блинов И. А., Котляров В. А. Новые данные о пироксидовых щелочных пегматитов и рудных зон Вишневых гор (Южный Урал) // Минералогия. 2018. № 4(3). С. 46–50.
- Nedosekova I. L., Belousova E. A., Sharygin V. V., Belyatsky B. V., Baynova T. B. Origin and evolution of the Ilmeny-Vishnevogorsky carbonatites (Urals, Russia): insights from trace-element compositions, and Rb–Sr, Sm–Nd, U–Pb, Lu–Hf isotope data // Mineralogy and Petrology, 2013. Vol. 107, issue 1. P. 101–123. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0223-9>
- Поляков В. О., Недосекова И. Л. Минералогия апогипербазитовых фенитов и карбонатитов южной части Ильменских гор // Минералы месторождений и зон техногенеза рудных районов Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 24–35.
- Chakhtouradian A. R., Williams C. T. Mineralogy of high field strength elements (Ti, Nb, Zr, Ta, Hf) in phoscoritic and carbonatitic rocks of the Kola Peninsula, Russia // Phoscorites and Carbonatites from mantle to mine: the key Example of the Kola Alkaline Province. 2004. P. 293–340. <https://doi.org/10.1180/MSS.10.9>
- Ярошевский А. А., Багдасаров Ю. А. Геохимическое разнообразие минералов группы пироксидов // Геохимия. 2008. № 12. С. 1322–1345. <https://doi.org/10.1134/S0016702908120045>
- Когарко Л. Н., Сорохтина Н. В., Зайцев В. А., Сенин В. Г. Редкометаллическая минерализация кальцитовых карбонатитов архипелага Капа Верде // Геохимия. 2009. № 6. С. 463–581. <https://doi.org/10.1134/S0016702909060019>
- Зайцев А. Н., Вильямс Ч. Т., Уолл Ф., Золотарев А. А. Эволюция химического состава минералов группы пироксидов из фоскоритов и карбонатитов Хибинского щелочного массива // ЗВМО. 2011. Ч. СХХХХ. № 3. С. 40–55.
- Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Добрецов Н. Л., Толстов А. В., Щербов Б. Л., Карманов Н. С., Герасимов Е. Ю., Брянская А. В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 6. С. 1080–1115. <https://doi.org/10.15372/GiG20150603>
- Недосекова И. Л., Прибавкин С. В. Рудные ниобиевые минералы группы пироксидов карбонатитовых комплексов Урала: особенности состава и геохимическая эволюция // Известия УГТУ. 2019. Вып. 3(55). С. 46–57. DOI 10.21440/2307-2091-2019-3-46-57

15. Khromova E. A., Doroshkevich A. G., Sharygin V. V., Izbrodin L. A. Compositional Evolution of Pyrochlore-Group Minerals in Carbonatites of the Belaya Zima Pluton, Eastern Sayan // *Geol. Ore Deposits*. 2017. Vol. 59, № 8. P. 752–764. <https://doi.org/10.1134/S1075701517080037>
16. Karup-Møller S. Uranium-rich pyrochlores from the Ilmaussaq complex, South Greenland // *Neues Jahrbuch für Mineralogie*. 2018. Vol. 195, issue 3. P. 177–190. <https://doi.org/10.1127/njma/2018/0114>
17. Walter B. F., Parsapoor A., Braunger S., Marks M. A. W., Wenzel T., Martin M., Markl G. Pyrochlore as a monitor for magmatic and hydrothermal processes in carbonatites from the Kaiserstuhl volcanic complex (SW Germany) // *Chemical Geology*. 2018. Vol. 498. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.08.008>
18. Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature // *The Canadian Mineralogist*. 2010. Vol. 48. P. 673–698. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.673>
19. Hogarth D. D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group // *American Mineralogist*. 1977. Vol. 62. P. 403–410.
20. Недосекова И. Л., Коротеев В. А., Беляцкий Б. В., Шарыгин В. В., Лепехина Е. Н., Прибавкин С. В. U–Pb-датирование рудных ниобиевых минералов группы пирохлора (Ильмено-Вишневогорский карбонатит-миаскитовый комплекс, Южный Урал) // *Литосфера*. 2018. Т. 18, № 5. С. 758–773. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-758-773>
21. Беляцкий Б. В., Лепехина Е. Н., Антонов А. В., Родионов Н. В., Недосекова И. Л., Петров О. В., Шевченко С. С., Сергеев С. А. О возрасте Nb-редкометалльного оруднения Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Южный Урал) // *ДАН*. 2018. Т. 481, № 6. С. 67–73. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18080251>
22. Краснобаев А. А., Русин А. И., Вализер П. М., Бушарина С. В. Цирконология кальцитовых карбонатитов Вишневогорского массива (Южный Урал) // *ДАН*. 2010. Т. 431, № 3. С. 1–4. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10030268>
23. Краснобаев А. А., Вализер П. М., Русин А. И., Бушарина С. В., Медведева Е. В. Цирконология гипербазитов Булдымского массива (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Южный Урал) // *ДАН*. 2015. Т. 461, № 1. С. 63–69. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15030022>
24. Краснобаев А. А., Вализер П. М., Бушарина С. В., Медведева Е. В. Цирконология миаскитов Ильменских гор (Южный Урал) // *Геохимия*. 2016. № 9. С. 797–813. <https://doi.org/10.1134/S0016702916070041>
25. Иванов К. С., Вализер П. М., Ерохин Ю. В., Погромская О. Е. О генезисе карбонатитов складчатых поясов (на примере Урала) // *ДАН*. 2010. Т. 435, № 2. С. 1–5. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110036>
26. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
27. Иванов К. С., Конторович В. А., Пучков В. Н., Федоров Ю. Н., Ерохин Ю. В. Тектоника Урала и фундамента Западной Сибири: основные черты геологического строения и развития // *Региональная геология*. 2014. № 2. С. 22–35.
28. Жданов В. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Уральская серия, лист О-41 (Екатеринбург): объяснит. записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 349 с.

Статья принята в редакцию 28 февраля 2019 г.

Ore niobium minerals of the pyrochlore group of carbonates of the Urals: compositional features and geochemical evolution

Irina Leonidovna NEDOSEKOVA*,
Sergey Vladimirovich PRIBAVKIN**

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Relevance of research is determined by the wide development of linear type carbonatite complexes in folded areas, their weaker knowledge compared to platform carbonatite complexes, including the ore potential. The genesis of Zr – Nb – REE mineralization, the ratio of ore mineralization with magmatic interstitial phases and metamorphism processes remain topical issues, as well as the duration of the formation of rare-metal deposits in linear carbonatite complexes of folded areas.

Purpose of research – development of the problem of rare metal ore formation in linear carbonatite complexes of folded areas using the Urals as an example, including the characterization of ore minerals of the pyrochlore group, their composition, and geochemical evolution.

Results of research. The features of the composition and geochemical evolution of niobium ore minerals of the pyrochlore group from the main types of rare-metal deposits associated with alkaline-carbonatite complexes of the Urals are studied. The pyrochlores of the Vishne-Vogorsky and Potaninsky deposits of niobium, ore occurrences of Uvilda and Purgino (Ilmeno-Vishnevogorsky miaskite-carbonatite complex), as well as the Buldymsky REE – Nb deposits (Buldymsky ultrabasite-carbonatite complex), and the Southern Urals were studied. Several mineral types of pyrochlore have been identified — hydroxyl- and oxycalcipyrochlor chlorine U (Ta)-containing, fluoro-calcium-pyrochlor (including Ta- and Sr – REE-containing varieties), hydroxyl-calcium-pyrochlor, keno- and hydro-pyrochlor, the formation of which is associated with certain evolutionary stages of the functioning of alkaline magma systems and secondary transformations of pyrochlore. The regularities of the evolution of the chemistry of pyrochlore — a successive change in the composition of uranopyrochlore with an increase in F and Nb (early carbonate trend) and a sharp change in the composition of crystallizing fluoro-calcium-pyrochlore chlorides (late carbonate trend) – record a sharp change in the conditions and chemistry of the mineral formation environment.

Conclusions. Studies of niobium ore minerals of the pyrochlore group of rare-metal deposits associated with linear carbonatite complexes of the Urals indicate that ore deposits were formed as a result of two stages of ore formation.

Keywords: pyrochlore, niobium deposits, linear carbonatite complexes, the Urals.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research grant No. 17–05–00154 and the topic of the state assignment of the IGG UB RAS No. AAAA-A18_118052590028-9.

REFERENCES

1. Bagdasarov Yu. A. 2014, On some conditions for the formation of linear-fractured carbonatites. *Litosfera* [Lithosphere], no. 4, pp. 113–119. (In Russ.)
2. Bonshtedt-Kupletskaya E. M. 1951, *Mineralogiya shchelochnykh pegmatitov Vishnevyykh gor* [Mineralogy of alkaline pegmatites of the Vishnevaya mountain]. Moscow, 176 p.
3. Eskova E. M., Nazarenko I. I. 1960, *Pirokhlор Vishnevyykh gor, yego parageneticheskiye assotsiatsii i osobennosti khimicheskogo sostava* [Pyrochlor of the Vishnevaya mountain, its paragenetic associations and chemical composition features]. Proceedings of the Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, no. 4, pp. 33–50.
4. Yes'kova Ye. M., Zhabin A. G., Mukhitdinov G. N. 1964, *Mineralogiya i geokhimiya redkikh elementov Vishnevyykh gor* [Mineralogy and geochemistry of rare elements of the Vishnevaya mountain]. Moscow, 319 p.
5. Efimov A.F., Lebedeva S.I., Levin V. Ya. 1985, Typochemism of accessory pyrochlore in the rocks of the alkaline complex of the Urals. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 2, pp. 201–208. (In Russ.)
6. Levin V. Ya., Ronenson B. M., Samkov V. S. et al. 1997, *Shchelochno-karbonatitovyye komplekсы Urala* [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Ekaterinburg, 274 p.
7. Popova V. I., Popov V. A., Blinov I. A., Kotlyarov V. A. 2018, New data on pyrochlores of alkaline pegmatites and ore zones of the Vishnevaya mountain (South Ural). *Mineralogiya* [Mineralogy], no. 4(3), pp. 46–50. (In Russ.)
8. Nedosekova I. L., Belousova E. A., Sharygin V. V., Belyatsky B. V., Baynova T. B. 2013, Origin and evolution of the Ilmeny-Vishnevogorsky carbonatites (Urals, Russia): insights from trace-element compositions, and Rb–Sr, Sm–Nd, U–Pb, Lu–Hf isotope data. *Mineralogy and Petrology*, vol. 107, issue 1, pp. 101–123. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0223-9>
9. Polyakov V. O., Nedosekova I. L. 1990, *Mineralogiya apogiperbazitovykh fenitov i karbonatitov yuzhnoy chasti Il'menskikh gor* [Mineralogy of apogiperbasite fenites and carbonatites of the southern part of the Ilmeny mountains]. Minerals of deposits and technogenesis zones of ore regions of the Urals. Sverdlovsk, pp. 24–35.
10. Chakhmouradian A. R., Williams C. T. 2004, Mineralogy of high field strength elements (Ti, Nb, Zr, Ta, Hf) in phoscoritic and carbonatitic rocks of the Kola Peninsula, Russia. Phoscorites and Carbonatites from mantle to mine: the key Example of the Kola Alkaline Province, pp. 293–340. <https://doi.org/10.1180/MSS.10.9>
11. Yaroshevsky A. A., Bagdasarov Yu. A. 2008, Geochemical diversity of minerals of the pyrochlore group. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 12, pp. 1322–1345. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0016702908120045>
12. Kogarko L. N., Sorokhtina N. V., Zaitsev V. A., Senin V. G. 2009, Rare metal mineralization of calcite carbonatites of the Capa Verde archipelago. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 6, pp. 463–581. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0016702909060019>
13. Zaitsev A. N., Williams Ch. T., Wall F., Zolotarev A. A. 2011, Evolution of the chemical composition of the minerals of the pyrochlore group from phosphorites and carbonatites of the Khibiny alkaline massif. *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], p. CXXXX, no. 3, pp. 40–55. (In Russ.)
14. Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Dobretsov N. L., Tolstov A. V., Scherbov B. L., Karmanov N. S., Gerasimov E. Yu., Bryanskaya A. V. 2015, Main ore-forming minerals abnormally rich ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia). *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], vol. 56, no. 6, pp. 1080–1115. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20150603>
15. Khromova E. A., Doroshkevich A. G., Sharygin V. V., Izbrodin L. A. 2017, Compositional Evolution of Pyrochlore-Group Minerals in Carbon-

*✉ vladi49@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7952-0639>

**pribavkins@gmail.com

- atites of the Belaya Zima Pluton, Eastern Sayan. *Geol. Ore Deposits*, vol. 59, no. 8, pp. 752–764. <https://doi.org/10.1134/S1075701517080037>
16. Karup-Møller S. 2018, Uranium-rich pyrochlores from the Limaussaq complex, South Greenland. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, vol. 195, issue 3, pp. 177–190. <https://doi.org/10.1127/njma/2018/0114>
17. Walter B. F., Parsapoor A., Braunger S., Marks M. A. W., Wenzel T., Martin M., Markl G. 2018, Pyrochlore as a monitor for magmatic and hydrothermal processes in carbonatites from the Kaiserstuhl volcanic complex (SW Germany). *Chemical Geology*, vol. 498, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.08.008>
18. Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. 2010, The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *The Canadian Mineralogist*, vol. 48, pp. 673–698. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.673>
19. Hogarth D. D. 1977, Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*, vol. 62, pp. 403–410.
20. Nedosekova I. L., Koroteev V. A., Belyatsky B. V., Sharygin V. V., Lepekhina E. N., Pribavkin S. V. 2018, U–Pb dating of ore niobium minerals of the pyrochlore group (Ilmeno-Vishnevogorsk carbonatite miaskitovy complex, South Ural). *Litosfera* [Lithosphere], vol. 18, no. 5, pp. 758–773. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-758-773>
21. Belyatsky B. V., Lepekhina E. N., Antonov A. V., Rodionov N. V., Nedosekova I. L., Petrov O. V., Shevchenko S. S., Sergeev S. A. 2018, About the age of Nb mineralization of the Ilmeno-Vishnevogorsk alkaline complex (Southern Urals). *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], vol. 481, no. 6, pp. 67–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1028334X18080251>
22. Krasnobaev A. A., Rusin A.I., Valizer P. M., Busharina S. V. 2010, Zirconology of calcite carbonatites of the Vishnevogorsky massif (Southern Urals). *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences]. Vol. 431, no. 3, pp. 1–4. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1028334X10030268>
23. Krasnobaev A. A., Valizer P. M., Rusin A. I., Busharina S. V., Medvedeva E. V. 2015, Zirconology of hyperbasites of the Buldym massif (Ilmeno-Vishnevogorsky complex, Southern Urals). *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], vol. 461, no. 1, pp. 63–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1028334X15030022>
24. Krasnobaev A. A., Valizer P. M., Busharina S. V., Medvedeva E. V. 2016, Zirconology of miaskitites of the Ilmen mountains (Southern Urals). *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 9, pp. 797–813. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0016702916070041>
25. Ivanov K. S., Valizer P. M., Erokhin Yu. V., Pogromskaya O. E. 2010, On the genesis of folded belt carbonatites (using the Urals as an example). *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], vol. 435, no. 2. P. 1–5. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110036>
26. Puchkov V. N. 2010, *Geologiya Urala i Priural'ya* [Geology of the Urals and the Transurals region], topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny. Ufa, 280 p.
27. Ivanov K. S., Kontorovich V. A., Puchkov V. N., Fedorov Yu. N., Erokhin Yu. V. 2014, Tectonics of the Urals and the foundations of Western Siberia: the main features of the geological structure and development. *Regional'naya geologiya* [Regional geology], no. 2, pp. 22–35. (In Russ.)
28. Zhdanov V. A. 2009, State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000, 349 p.

The article was received on May 10, 2019