

УДК 549.51(470.55)+549.6

ОКСИДЫ И СИЛИКАТЫ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОДАХ ИЛЬМЕНОГОРСКОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Е.П. Макагонов^{1,2}, В.А. Котляров¹, В.А. Муфтахов^{1,2}

¹Институт минералогии УрО РАН г. Миасс; mak@mineralogy.ru

²Геологический факультет Южно-Уральского государственного университета (НИУ),
филиал в г. Миассе

OXIDES AND SILICATES OF RARE AND RARE-EARTH ELEMENTS IN ALKALINE ROCKS OF THE ILMENOGORSKY BLOCK (SOUTHERN URALS)

E.P. Makagonov^{1,2}, V.A. Kotlyarov¹, V.A. Muftakhov^{1,2}

¹Institute of Mineralogy UB RAS, Miass; mak@mineralogy.ru

²Faculty of Geology, National Research South Ural State University, Miass Branch

Значительная часть редких и РЗЭ-элементов в породах массива образует собственные минералы. В щелочных породах Ильменогорского массива (Южный Урал) установлены оксиды и силикаты редких и редкоземельных элементов: оксинатропироксид, оксикальциопироксид, гидроксикальциопироксид, гидроксинатропироксид, ниобиевый рутил (ильменорутит), ферсмит, эвксенит, циркон, алланит-(Ce), чевкинит-(Ce), катаплеит, монголит.

Главное отличие пироксидов из фенитов от пироксидов из миаскитов – повышенное количество примесей. В пироксидовых фенитах среднее (в скобках – максимальное) содержание (мас. %): Ta₂O₅ 3.08 (4.96), ThO₂ 3.17 (4.01), UO₂ 4.07 (10.77), РЗЭ 1.79 (2.06). В пироксидовых миаскитах, соответственно: Ta₂O₅ 1.11 (1.86), ThO₂ 0.76 (2.07), UO₂ 0.34 (0.96), РЗЭ 1.87 (2.08).

В ниобиевом рутиле содержится (мас. %): TiO₂ 33.93–31.79, Nb₂O₅ 36.04–34.93, Fe₂O₃ 9.03–17.39, Ta₂O₅ 6.46–7.67, La₂O₃ 0–0.77, Ce₂O₃ 0–1.54, ThO₂ 0.77–2.9, UO₂ 0.95–1.06.

Состав эвксенита (мас. %): TiO₂ 21.87, Nb₂O₅ 43.49, FeO 1.31, Ta₂O₅ 1.18, Y₂O₃ 9.5, CaO 3.73, РЗЭ 16.33, в ферсмите – TiO₂ 15.07–18.3, Nb₂O₅ 40.03–50.54, FeO 0.80–1.03, Ta₂O₅ 0–3.52, Y₂O₃ 0.63–7.36, CaO 5.11–7.00, UO₂ 22.98–23.46, РЗЭ 1.25–18.94. Среднее содержание HfO₂ в цирконах (в последовательности: метаморфиты, фениты, миаскиты, мас. %): 2.06, 1.58, 1.30. РЗЭ (мас. %) в алланите-(Ce) 18.28–27.05, в чевкините-(Ce) 44.55–45.35.

Катаплеит содержит (мас. %): SiO₂ 44.72–45.85, TiO₂ 0.08–0.46, FeO 0.6–0.19, CaO 0.04–0.23, Na₂O 14.86–15.71, ZrO₂ 29.3–30.9, HfO₂ 0.18–0.55.

Монголит содержит (мас. %): SiO₂ 12.84–14.77, TiO₂ 4.54–4.76, CaO 5.56–6.68, Nb₂O₅ 34.81–38.58, Ta₂O₅ 3.27–3.47, ThO₂ 3.09–3.83, UO₂ 2.95–7.68, РЗЭ 6.49–7.16, примеси Pb, P, Ba, Sr, Na, Sc, Y, Mn, Fe, Al.

Распределение описываемых минералов по глубине неравномерное. Повышенные содержания отмечаются в полевошпатовых породах и биотитовых сиенитах, часто содержащих карбонаты в качестве минеральной примеси, в пегматоидных прожилках. Для большинства этих минералов устанавливается несколько генераций. Их кристаллизация началась одновременно с породообразующими минералами.

Катаплеит и монголит в Ильменах установлены впервые.

Илл. 6. Табл. 6. Библ. 20.

Ключевые слова: оксинатропироксид, оксикальциопироксид, гидроксикальциопироксид, гидроксинатропироксид, ниобиевый рутил (ильменорутит), ферсмит, эвксенит, циркон, алланит-(Ce), чевкинит-(Ce), катаплеит, монголит, Ильменогорский массив, Южный Урал.

A significant part of the REE and rare elements in the rocks of the Ilmenogorsky block forms its own minerals. Oxides and silicates of rare and rare-earth elements in alkaline rocks of Ilmenogorsky block (Southern Urals) include oxynatropyrochlore, oxycalcipyrochlore, hydroxycalcipyrochlore, hydroxynatropyrochlore, niobium rutile (ilmenorutile), fersmite, euxenite, zircon, allanite-(Ce), chevkinite-(Ce), catapleiite, mongolite.

Pyrochlore of fenites is distinct from that of miaskites by the higher content of trace elements (mean (maximum), wt.%): 3.08 (4.96) Ta_2O_5 , 3.17 (4.01) ThO_2 , 4.07 (10.77) UO_2 , 1.79 (2.06) REE versus 1.11 (1.86) Ta_2O_5 , 0.76 (2.07) ThO_2 , 0.34 (0.96) UO_2 , 1.87 (2.08) REE, respectively.

The Nb rutile contains (wt. %) 33.93–31.79 TiO_2 , 36.04–34.93 Nb_2O_5 , 9.03–17.39 Fe_2O_3 , 6.46–7.67 Ta_2O_5 , 0–0.77 La_2O_3 , 0–1.54 Ce_2O_3 , 0.77–2.9 ThO_2 , 0.95–1.06 UO_2 . The composition of euxenite is as follows (wt. %): 21.87 TiO_2 , Nb_2O_5 , 43.49, FeO 1.31, 1.18 Ta_2O_5 , Y_2O_3 9.5, CaO 3.73, REE 16.33. Fersmite contains 15.07–18.30 TiO_2 , 40.03–50.54 Nb_2O_5 , 0.80–1.03 FeO , 0–3.52 Ta_2O_5 , 0.63–7.36 Y_2O_3 , 5.11–7.00 CaO , 22.98–23.46 UO_2 , 1.25–18.94 REE. The HfO_2 average content of zircon in metamorphic rocks, fenites, and miaskites is 2.06, 1.58, and 1.30 wt. %, respectively. The REE contents of allanite-(Ce) and chevkinite-(Ce) are 18.28–27.05 and 44.55–45.35 wt. %, respectively. Catapleiite contains (wt. %) 44.72–45.85 SiO_2 , 0.08–0.46 TiO_2 , 0.6–0.19 FeO , 0.04–0.23 CaO , 14.86–15.71 Na_2O , 29.3–30.9 ZrO_2 , and 0.18–0.55 HfO_2 . Mongolite contains (wt. %) 12.84–14.77 SiO_2 , 4.54–4.76 TiO_2 , 5.56–6.68 CaO , 34.81–38.58 Nb_2O_5 , 3.27–3.47 Ta_2O_5 , 3.09–3.83 ThO_2 , 2.95–7.68 UO_2 , 6.49–7.16 REE, and small amount of Pb, P, Ba, Sr, Na, Sc, Y, Mn, Fe, Al.

These minerals are unevenly distributed by depth. The elevated contents are observed in feldspar rocks, biotite syenites (often with carbonates), and pegmatoid veins. Most minerals are characterized by several generations. Their crystallization was simultaneous with other minerals. Catapleiite and mongolite are identified for the first time in the Ilmenogorsky block.

Figures 6. Tables 6. References 20.

Key words: oxynatropyrochlore, oxycalcipyrochlore, hydroxycalcipyrochlore, hydroxynatropyrochlore, niobium rutile (ilmenorutile), fersmite, euxenite, zircon, allanite-(Ce), chevkinite, catapleiite, mongolite, Ilmenogorsky miaskite block.

Введение

Исследования минералогии Ильменских гор и Ильменогорского миаскитового массива охватывают весьма значительный промежуток времени. При этом главное внимание уделялось крупным кристаллам минералов из пегматитов, которые характеризуют завершающие стадии формирования пород. Сведения о минералах редких и редкоземельных элементов из горных пород щелочного комплекса, за исключением циркона, незначительны и основываются на материале, собранном по поверхности массива. Эти данные требуют уточнения в связи с последними изменениями в номенклатуре минералов, утверждаемых ММА, и применением в исследованиях микрозондового анализа.

Для исследования массива на глубоких горизонтах и сравнения с минералогией по поверхности имеется единственная возможность – сохранившийся керн структурной скважины С-2000, вскрывшей миаскитовый массив на глубину 2 км. Первичные данные распределения минералов по

этому разрезу, приведены в монографии (Макагонов и др., 2003). Ранее здесь были описаны карбонаты РЗЭ, Ba, Sr и Na (Макагонов и др., 2017).

В настоящей работе приводится описание оксидов и силикатов редких и редкоземельных элементов: оксинатропирохлора, оксикальциопирохлора, гидроксикальциопирохлора, гидроксинатропирохлора, ниобиевого рутила (ильменорутила), ферсмита, эвксенита, циркона, алланита-(Ce), чевкинита-(Ce), катаплеита и монголита. Последние два минерала обнаружены в Ильменах впервые.

Методы исследования

Химический состав минералов определен микрозондовым методом в Институте минералогии УрО РАН (РЭММА-202М с энерго-дисперсионной приставкой LZ-5 при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 3×10^{-3} А, диаметр зонда ~ 5 мкм), аналитик В.А. Котляров) и в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана (Superprobe JCSA-733 JEOL, аналитик В.А. Муфтахов).

Результаты исследования

Минералы надгруппы пироклора распространены практически по всему разрезу, вскрытому структурной скважиной С-2000, но распределение в породах разреза неравномерное. Это подтверждается и распределением ниобия в породах, содержание которого на 80–95 % связано с этими минералами (рис. 1). Во вмещающих метаморфических породах среднее содержание Nb 0.004 мас. %.

В миаскитовом массиве пироклор наблюдается в отдельных прослоях в виде рассеянной вкрапленности зёрен размером от 5 мкм до 3 мм буровато-красного цвета. Располагаются пироклоры обычно в промежутках между зёрнами других минералов, часто совместно с алланитом-(Ce). Как правило, миаскиты с пироклором содержат ильменит, титанит, циркон, а также анальцит, содалит, натролит, карбонаты, барит и др. минералы. В экзоконтакте миаскитового массива пироклор наблюдается в фенитах, альбититах, пегматитах полевошпатовых и

пироксен-полевошпатовых, в кальцит-полевошпатовых породах (карбонатитах), в которых он образует рассеянную вкрапленность. На глубине 297.5 м в полевошпатовой породе содержится до 0.25 об. % пироклора.

Пироклор наблюдается в виде октаэдрических кристаллов, но значительная часть индивидов имеет неправильную форму, реже близкую к изометричной (рис. 2). Цвет пироклора различный: тёмно-бурый, красно-бурый, жёлто-бурый, рыжевато-бурый, тёмно-красный. Иногда зонален: внутри красно-бурый, с периферии – рыжевато-бурый. Часто зёрна пироклора покрыты корочками серовато-желтых продуктов изменения. Под микроскопом пироклоры светло-бурые, изотропные.

По составу пироклоры кальцио-натриевые. Среди пироклоров из миаскитов выделяются виды: *оксинатропироклоры* (табл. 1, ан. 1–4), *оксикальциопироклоры* (см. табл. 1, ан. 5) и *гидроксикальциопироклоры* (см. табл. 1, ан. 6–7).

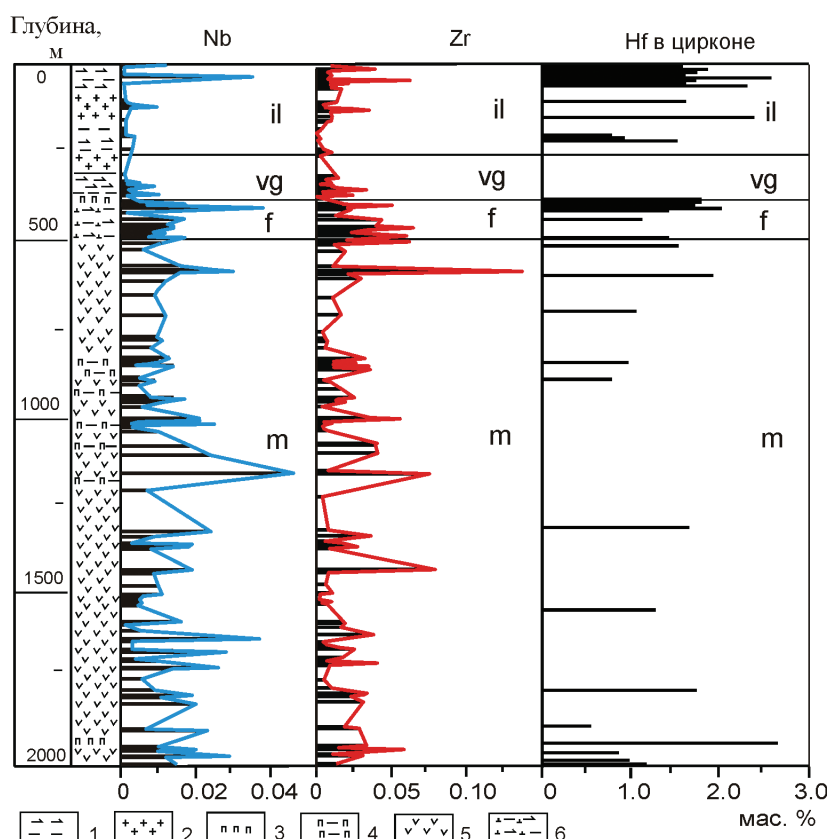


Рис. 1. Содержание ниобия и циркония в породах скважины С-2000 и гафния в цирконах.

1 – амфиболиты, гнейсы; 2 – граниты; 3 – полевошпатовые породы; 4 – биотит-полевошпатовые породы; 5 – миаскиты; 6 – фениты биотит-амфиболовые. Метаморфические толщи: il – ильменогорская, vg – вишневогорская. f – фениты, m – миаскиты.

Fig. 1. Nb and Zr content in the rocks of the well C-2000 (a) and Hf content of zircon (b).

1 – amphibolites, gneisses; 2 – granites; 3 – feldspar rocks; 4 – biotite-feldspar rocks; 5 – miaskites; 6 – biotite-amphibole fenites. Metamorphic strata: il – Ilmenogorsky, vg – Vishnevogorsky. f – fenites, m – miaskites.

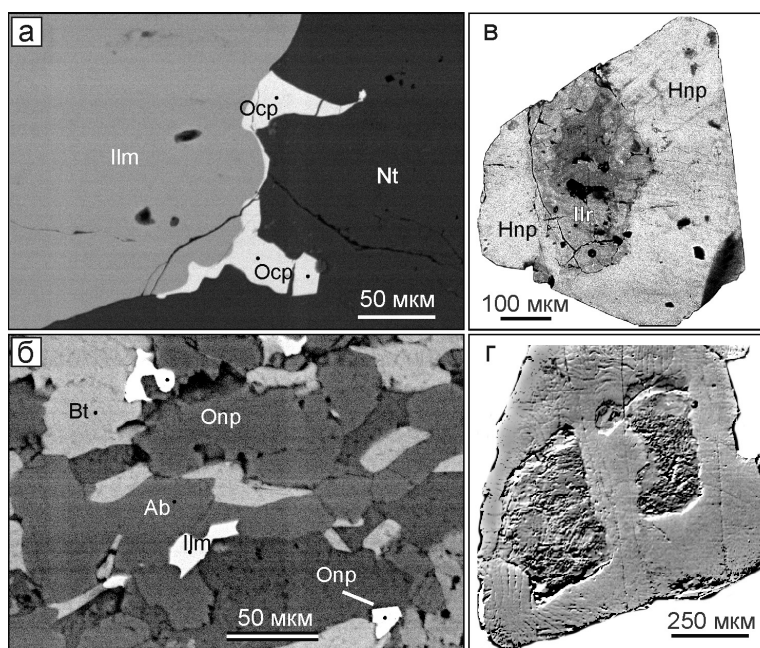


Рис. 2. Форма выделений пирохлора.

а – оксикальциопирохлор в виде прожилков в натролите на границе с ильменитом; б – зёрна оксинатропирохлора в тонкозернистом миаските; в – октаэдрический кристалл гидроксинатропирохлора, выросший на ниобиевом рутиле (ильменорутите); г – псевдоморфоза гидроксикальциопирохлора по ниобиевому рутилу (ильменорутиту). Ab – альбит, Bt – биотит, Hnp – гидроксинатропирохлор, Ilm – ильменит, Ilr – ниобиевый рутил (ильменорутит), Nt – натролит, Ocp – оксикальциопирохлор, Onp – оксинатропирохлор.

Fig. 2. Morphology of pyrochlore.

а – oxycalcipyrochlore veins in natrolite at the contact with ilmenite; б – oxynatropyrochlore grains in fine-grained miaskite; в – octahedral hydroxynatropyrochlore crystal on Nb rutile (ilmenorutile); г – pseudomorphic hydroxynatropyrochlore after Nb rutile (ilmenorutile). Ab – albite, Bt – biotite, Hnp – hydroxynatropyrochlore, Ilm – ilmenite, Ilr – Nb rutile (ilmenorutile), Nt – natrolite, Ocp – oxycalcipyrochlore, Onp – oxynatropyrochlore.

Пирохлор из экзоконтакта массива в целом подобен составу пирохлора из миаскитового массива: близкий к средним кальцио-натриевым разновидностям. Главное отличие пирохлоров из фенитов от пирохлоров из миаскитов – повышенное количество примесей. В пирохлорах фенитов среднее (максимальное) содержание (мас. %): Ta_2O_5 3.08 (4.96), ThO_2 3.17 (4.01), UO_2 4.07 (10.77), РЗЭ 1.79 (2.06). В миаскитах, соответственно: Ta_2O_5 1.11 (1.86), ThO_2 0.76 (2.07), UO_2 0.34 (0.96), РЗЭ 1.87 (2.08).

Характерная особенность пирохлоров экзоконтактной зоны массива – наличие в центральной части индивидов включений ильменорутила, алланита и других титано-ниобатов, часто полностью замещённые пирохлором (см. рис. 2в, г). В фантомных пирохлорах наибольшие флуктуации химического состава отмечаются в участках псевдоморфного замещения минералов. Во внешних зонах этих пирохлоров флуктуации состава существенно меньше, при этом в кристаллохимической формуле отклонения коэффициентов А и В дости-

гают 0.2 единиц. В среднем состав краевых частей фантомных пирохлоров вполне соответствует минеральному виду *гидроксинатропирохлору* (см. табл. 1, ан. 8).

На дебаеграмме пирохлора с глубины 416 м, полученной ранее, выделяются основные линии (d, Å): 5.950(4); 3.112(3); 2.905(10); 2.586(4); 1.832(8); 1.565(7); 1.501(1); 1.298(2); 1.193(4); 1.062(4); 1.001(5). У пирохлора с глубины 420.5 м на дебаеграмме слабо выделяются линии 3.307; 3.000(10); 1.837(6); 1.569(5). Дифрактограмма с этого образца показывает, что пирохлор практически метамиктен, но на общем фоне выделяется линия с d 3.007 Å.

Рутил ниобиевый (ильменорутит $FeTiNbO_6$) – характерный минерал щелочных пород и карбонатов. В скважине С-2000 он обнаружен в сиенит-пегматитах в зоне фенитизированного экзоконтакта миаскитового массива в необычных срастаниях. Его кристаллы и выделения неправильной формы наблюдаются в виде включений в кристаллах пирохлора (см. рис. 2в). Ильменорутит отличается высо-

Таблица 1

Химический состав оксинатропирохлора (1–4), оксикальциопирохлора (5), гидроксикальциопирохлора (6–7) и гидроксинатропирохлора (8) (мас. %)

Table 1

Chemical composition of oxynatropyrochlore (1–4), oxycalcipyrochlore (5), hydroxycalcipyrochlore (6–7) and hydroxynatropyrochlore (8) (wt. %)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8*
SiO ₂	–	–	–	1.10	–	–	–	0.65
TiO ₂	9.02	12.14	12.24	7.78	8.23	11.24	11.65	9.99
Al ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	0.08
FeO	0.59	0.62	0.69	0.52	–	0.51	0.59	0.61
MnO	–	–	0.18	–	–	0.36	0.56	0.27
CaO	10.85	6.83	6.73	7.83	11.51	13.15	13.16	11.45
SrO	1.66	0.73	0.43	1.52	0.8	1.33	1.56	1.33
Na ₂ O	6.36	6.31	6.08	8.59	6.16	7.08	6.45	7.30
K ₂ O	–	–	–	–	–	–	0.06	0.05
Nb ₂ O ₅	54.38	47.21	47.23	57.92	56.58	45.1	46.68	51.16
Ta ₂ O ₅	1.08	1.43	1.55	1.86	0.18	4.96	3.45	2.90
Y ₂ O ₃	0.77	0.80	0.59	0.38	0.93	–	–	0.41
Sc ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	0.01
La ₂ O ₃	1.80	1.61	1.96	1.45	1.30	–	0.71	0.62
Ce ₂ O ₃	7.57	10.97	11.78	4.7	6.2	2.27	2.13	1.92
Pr ₂ O ₃	1.11	1.77	2.05	0.56	1.21	0.71	–	0.22
Nd ₂ O ₃	2.98	4.79	4.6	1.47	3.5	0.80	0.92	0.52
Sm ₂ O ₃	–	–	–	0.24	–	–	–	0.03
Er ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	0.03
Yb ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	0.02
ThO ₂	–	2.07	1.61	1.46	–	3.02	2.75	3.23
UO ₃	–	0.68	0.32	0.35	–	4.19	4.64	4.23
PbO	–	–	–	–	–	–	–	0.35
WO ₃	–	–	–	–	1.07	–	–	0.04
SnO ₂	–	–	–	–	–	–	–	0.04
V ₂ O ₅	–	–	–	–	–	0.26	0.33	0.04
Сумма	98.17	97.96	98.04	97.73	97.67	94.98	95.64	97.50
H ₂ O **	2.35	2.22	2.21	2.38	2.31	4.69	4.69	3.30
Всего сумма	100.52	100.18	100.25	100.11	99.98	99.67	100.33	100.80
Расчётные формулы на 4 катиона								
1. (Na _{0.78} Ca _{0.74} Ce _{0.18} Nd _{0.07} Sr _{0.06} La _{0.04} Pr _{0.03} Fe _{0.03} Y _{0.03} Σ 1.99)(Nb _{1.56} Ti _{0.43} Ta _{0.02} Σ 2.01O ₆ (O _{0.62} (OH) _{0.38})); 2. (Na _{0.82} Ca _{0.49} Ce _{0.27} Nd _{0.12} La _{0.04} Pr _{0.04} Sr _{0.03} Fe _{0.03} Th _{0.03} Y _{0.03} U _{0.01} Σ 1.92)(Nb _{1.44} Ti _{0.62} Ta _{0.03} Σ 2.08O ₆ (O _{0.51} (OH) _{0.49})); 3. (Na _{0.80} Ca _{0.49} Ce _{0.29} Nd _{0.11} La _{0.05} Pr _{0.05} Fe _{0.04} Sr _{0.02} Th _{0.02} Y _{0.02} Mn _{0.01} Σ 1.90)(Nb _{1.44} Ti _{0.62} Ta _{0.03} Σ 2.10O ₆ (O _{0.52} (OH) _{0.48})); 4. (Na _{1.05} Ca _{0.53} Ce _{0.11} Sr _{0.07} La _{0.06} Pr _{0.03} Nd _{0.03} Fe _{0.03} Th _{0.02} Pr _{0.01} Sm _{0.01} Y _{0.01} Σ 1.96)(Nb _{1.64} Ti _{0.37} Ta _{0.03} Σ 2.04O ₆ (O _{0.52} (OH) _{0.48})); 5. (Ca _{0.80} Na _{0.77} Ce _{0.15} Nd _{0.08} Sr _{0.03} La _{0.03} Pr _{0.03} Y _{0.03} W _{0.02} Σ 1.94)(Nb _{1.66} Ti _{0.40} Σ 2.06O ₆ (O _{0.5} (OH) _{0.5})); 6. (Ca _{0.90} Na _{0.87} U _{0.06} Sr _{0.05} Ce _{0.05} Th _{0.04} Fe _{0.03} Mn _{0.02} Pr _{0.02} Nd _{0.02} V _{0.01} Σ 2.07)(Nb _{1.30} Ti _{0.54} Ta _{0.09} Σ 1.93O ₆ (OH)); 7. (Ca _{0.90} Na _{0.80} U _{0.07} Sr _{0.06} Ce _{0.05} Th _{0.04} Fe _{0.03} Mn _{0.03} La _{0.02} Nd _{0.02} V _{0.01} Σ 2.03)(Nb _{1.35} Ti _{0.56} Ta _{0.06} Σ 1.97O ₆ (OH)); 8. (Na _{0.88} Ca _{0.77} U _{0.06} Th _{0.05} Sr _{0.05} Ce _{0.04} Si _{0.04} Fe _{0.03} La _{0.03} Nd _{0.01} Al _{0.01} Mn _{0.01} Pb _{0.01} Y _{0.01} Σ 2.01)(Nb _{1.47} Ti _{0.47} Ta _{0.05} Σ 1.99O ₆ (O _{0.46} (OH) _{0.54})).								

Примечание. *среднее из 13 анализов. H₂O** – расчёт. 1–6 – из миаскитов; 6–8 – из фенитов. Пробы С-2000 с глубины: 1, 6–8 – 822.3 м; 2–5 – 1969 м; 9–10 – 416 м. РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров.

Note. *average of 13 analyses. H₂O** – calculated. 1–8 – from miaskite; 9–11 – from fenite. Samples of the well C-2000 from depth: 1, 6–8 – 822.3 m; 2–5 – 1969 m; 9–10 – 416 m. Analyst V.A. Kotlyarov.

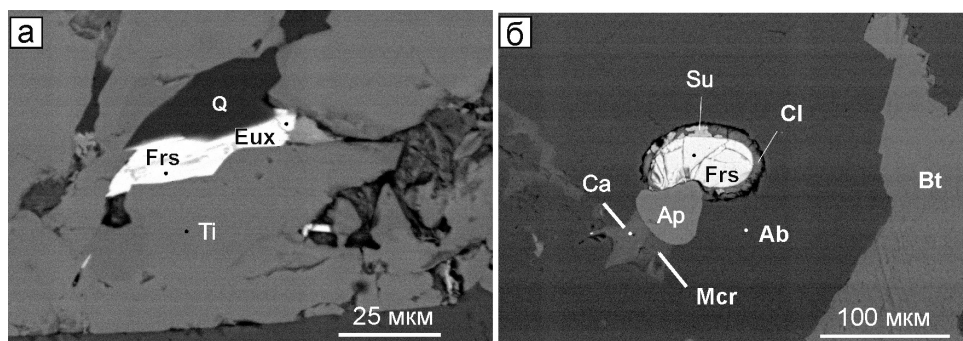


Рис. 3. Выделения эвксенита и ферсмита в породах кровли миаскитового массива.

а – включение ферсмита и эвксенита в титаните из гранитного пегматита; б – ферсмит в альбите из карбонатита. Ab – альбит, Ap – апатит, Bt – биотит, Ca – кальцит, Cl – хлорит, Eux – эвксенит, Frs – ферсмит, Q – кварц, Mcr – микроклин, Su – сульфаты железа, Ti – титанит.

Fig. 3. Aggregates of euxenite and fersmite in the rocks of the miaskite block.

а – inclusion of fersmite and euxenite in titanite from granitic pegmatite; б – fersmite in albite from carbonatite. Ab – albite, Ap – apatite, Bt – biotite, Ca – calcite, Cl – chlorite, Eux – euxenite, Frs – fersmite, Q – quartz, Mcr – microcline, Su – Fe sulfates, Ti – titanite.

ким содержанием Nb_2O_5 , содержит примеси урана и тория. Химический состав ильменорутила из сиенитов (мас. %):

на глубине 398.3 м – TiO_2 33.93, Nb_2O_5 36.04, Fe_2O_3 9.03, Ta_2O_5 6.46, MnO 1.48, BaO 4.25, SrO 1.94, La_2O_3 0.77, Ce_2O_3 1.54, ThO_2 2.9, UO_2 1.06, Сумма 99.40. Кристаллохимическая формула (расчёт на 1 катион) $Ti_{0.45}Nb_{0.29}Fe_{0.12}Ta_{0.03}Mn_{0.02}Ba_{0.03}Sr_{0.02}Th_{0.01}La_{0.01}Ce_{0.01}O_2$;

на глубине 420.6 м – TiO_2 31.79, Nb_2O_5 34.93, Fe_2O_3 17.39, Ta_2O_5 7.67, MnO 1.86, SrO 1.92, CaO 1.44, ThO_2 0.77, UO_2 0.95, сумма 98.72. Кристаллохимическая формула $Ti_{0.40}Nb_{0.27}Fe_{0.22}Ta_{0.04}Mn_{0.03}Ca_{0.03}Sr_{0.02}O_2$.

В пегматоидных выделениях в миаскитах (глуб. 800 м) ильменорутил отмечен совместно с агрегатами канкринита, содалита, содержащих акцессорные минералы: магнетит, пирохлор, циркон.

Ферсмит и эвксенит-(Y) $(Ca,Ce,Na)(Nb,Ta)_2O_6$ – $(Y,Ca,Ce,U,Th)(Nb,Ta,Ti)_2O_6$. Минералы в Ильменах ранее были обнаружены в гранитных пегматитах (Макаровичкин и др., 1963). В щелочных породах ферсмит описан в Вишнёвых горах (Бонштедт-Куплетская, 1951). В разрезе по скважине С-2000 минерал переменного ферсмит–эвксенитового-(Y) состава обнаружен в гранитном пегматите, залегающим в фенитизированном плагосланце вишневогорской толщи (глубина 227.3 м). Среди породообразующих минералов плагосланцев отмечают андезин, пироксен, биотит, микроклин, кварц. В составе пироксена диопсидовый минал составляет 55–66 %; геденбергитовый – 29–33 %, эгири-

новая составляющая – 3–16 %. В пегматите количество тёмноцветных минералов незначительно. Преобладающий минерал пегматита – альбит. Акцессорные минералы: титанит, молибденит, пирротин, халькопирит, пирит, гематит, ильменит, алланит, кальцит.

Зёрна с переменным составом ферсмит–эвксенит-(Y) обнаружены в кварц–плагноклазовом пегматоиде среди зёрен титанита (рис. 3). Содержание оксидов редкоземельных элементов в этом минерале достигает 20 мас. %. Среди них преобладают Nd_2O_3 и Pm_2O_3 (табл. 2, ан. 1–2).

Ферсмит так же обнаружен в фенитовом ореоле миаскитового массива (глубина 372.8 м). Кроме альбита в этих породах содержится пироксен и амфибол. Пироксен – салит с 48–56 % геденбергитового минала, эгириновый минал в нём составляет 4–6 %. Амфибол натрокальциевый – ферроэдентит с 30 % тремолитовой составляющей и значительной примесью калия – 0.28 к.а.ф. Породообразующих количеств достигает биотит среднего состава. Включения карбоната представлены кальцитом с незначительной примесью железа и марганца. Здесь же широкий набор акцессорных минералов: апатит, циркон, торит с уранинитом, титанит, халькопирит, молибденит, пирит, пирротин, хлорит.

Выделение ферсмита в сростании с апатитом наблюдается в виде капли в альбите (см. рис. 3б). «Капля» находится в оболочке из нонтронизированного пироксена и сульфатизированного пирита. Ферсмит титанистый, с низким содержанием редких земель и высоким содержанием урана (см. табл. 2, ан. 3–4).

Таблица 2

Химический состав эвксенита (1) и ферсмита (2–4) (мас. %)

Table 2

Chemical composition of euxenite (1) and fersmite (2–4) (wt. %)

Компоненты	1	2	3	4	Компоненты	1	2	3	4
TiO ₂	21.87	15.07	17.46	18.3	Ce ₂ O ₃	1.74	4.57	1.09	1.13
Al ₂ O ₃	—	—	0.56	0.17	Pr ₂ O ₃	—	—	0.16	0.20
FeO	1.31	1.03	0.80	0.95	Nd ₂ O ₃	4.82	5.39	—	—
MnO	—	—	1.1	1.23	Pm ₂ O ₃	2.91	2.33	—	—
CaO	3.73	5.11	6.91	7.00	Gd ₂ O ₃	5.40	5.07	—	—
Nb ₂ O ₅	43.49	50.54	40.03	40.7	Dy ₂ O ₃	1.27	1.03	—	—
Ta ₂ O ₅	1.18	—	3.80	3.52	UO ₂	—	—	22.98	23.46
Sc ₂ O ₃	0.13	—	—	—	WO ₃	—	—	0.88	0.43
Y ₂ O ₃	9.50	7.36	0.75	0.63	H ₂ O*	2.61	2.55	2.40	2.44
La ₂ O ₃	0.19	0.55	—	—	Сумма	100.15	100.60	98.92	100.16
Расчёт на 3 катиона									
1. (Y _{0.29} Ca _{0.23} Nd _{0.10} Gd _{0.10} Fe _{0.06} Pm _{0.06} Ce _{0.04} Dy _{0.02}) _{Σ 0.91} (Nb _{1.13} Ti _{0.94} Ta _{0.02}) _{Σ 2.09} O ₆ ·H ₂ O; 2. (Ca _{0.32} Y _{0.23} Nd _{0.11} Ce _{0.10} Gd _{0.10} Fe _{0.05} Pm _{0.05} La _{0.01} Dy _{0.02}) _{Σ 0.99} (Nb _{1.34} Ti _{0.67}) _{Σ 2.01} O ₆ ·(OH) _{0.5} ; 3. (Ca _{0.46} U _{0.32} Mn _{0.06} Fe _{0.04} Al _{0.04} Y _{0.02} W _{0.01} Ce _{0.02}) _{Σ 0.99} (Nb _{1.13} Ti _{0.82} Ta _{0.06}) _{Σ 2.01} O ₆ ·H ₂ O; 4. (Ca _{0.46} U _{0.32} Mn _{0.06} Fe _{0.05} Ce _{0.03} Y _{0.02} Al _{0.01} W _{0.01}) _{Σ 0.96} (Nb _{1.13} Ti _{0.85} Ta _{0.06}) _{Σ 2.04} O ₆ ·H ₂ O;									

Примечание. H₂O* – расчёт. 1–2 – из гранитного пегматита; 3–4 – из карбонатита. Пробы С-2000 с глубины: 1–2 – 227.6 м, 3–4 – 372.8 м. РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров.

Note. H₂O* – calculated. 1–2 – from granitic pegmatite, 227.6 m deep; 3–4 – from carbonatite, 372.8 m deep. Analyst V.A. Kotlyarov.

Циркон ZrSiO₄ встречается практически во всех породах комплекса. Широкая распространённость, относительная устойчивость в природе, а также возможность аппаратного получения возрастных характеристик по изотопным отношениям обусловили к нему повышенное внимание исследователей. Значительная часть исследований морфологии, внутреннего строения и химического состава в Ильменогорском комплексе касается крупных кристаллов из пегматитов (Минералы..., 1949; Попов, Попова, 2006; Попова, 1978; Попова, 1995; Халезова, 1963; и др.).

Для определения возраста образования цирконов использовались мелкие выделения циркона, так как крупные индивиды более изменчивые, и геохронологические значения дискордантны. Исследования акцессорного циркона Ильменогорского комплекса в целом подтверждают известную тенденцию по распределению габитусов цирконов: в фенитизированных гнейсах часто обнаруживаются реликтовые призматические и длиннопризматические жёлтые прозрачные зёрна цирконовой огранки. Вторичный циркон в этих породах подобен наблюдаемому в сиенитах: бурые призматические индивиды с гиацинтовой и цирконовой огранкой. Для миаскитов более характерны короткопризматические и дипирамидальные зёрна. Общая картина

усложняется из-за наложения генетически различных геологических процессов при формировании Ильменогорского массива.

В миаскитах Ильменогорского массива были выделены типы циркона, отличающиеся морфологией, формой включений, особенностями примесей и хронологией. К первому и второму типам отнесены короткопризматические и призматические кристаллы. Эти цирконы желтого и коричневого цвета, прозрачные, с первичной ростовой зональностью, выявляемой катодолюминесценцией (CL), часто с замутнением по краям и вдоль трещин, с низкими отношениями Th/U. К третьему типу отнесены дипирамидальные и короткопризматические кристаллы. Цирконы этого типа коричневые, мутные, с низкими содержаниями урана, но с самым высоким отношением Th/U, со слабым CL-свечением. К четвёртому типу отнесены ксеноморфные зёрна, мутно-молочные, изредка частично прозрачные, трещиноватые, с включениями порообразующих минералов, с наиболее высокими содержаниями U (Чернышев и др., 1987; Крамм и др., 1993).

В литературе указывается, что значительная часть первичных цирконов испытала ряд преобразований: метамиктизацию, коррозирование и дробление, «эмульсионный» распад и последующее рафинирование (Краснобаев и др., 2010). При гене-

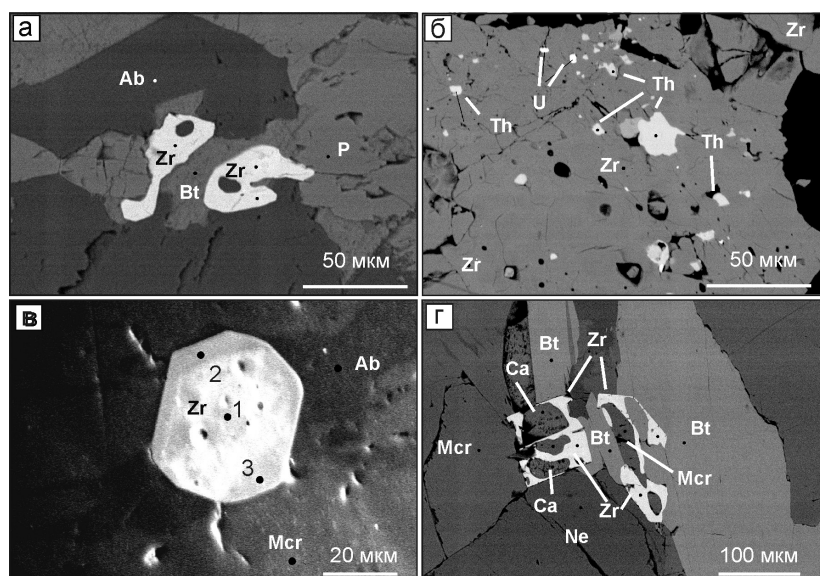


Рис. 4. Форма выделений циркона в сиенитах (а–б) и в миаскитах (в–г).

а – частично идиоморфные кристаллы циркона; б – выделения циркона с включениями гидроторита и гидронастурана; в – зональный кристалл циркона; г – скелетный кристалл циркона. Ab – альбит, Bt – биотит, Ca – кальцит, Mcr – микроклин, Ne – нефелин, P – пироксен, Th – гидроторит, U – гидронастуран, Zr – циркон.

Fig. 4. Morphology of zircon in syenites (a-b) and miaskites (c-d).

а – partly idiomorphic zircon crystals; б – zircon with inclusions of hydrothorite and hydrotasturan; в – zonal zircon; г – skeletal zircon. Ab – albite, Bt – biotite, Ca – calcite, Mcr – microcline, Ne – nepheline, P – pyroxene, Th – hydrothorite, U – hydronasturan, Zr – zircon.

тической расшифровке текстурных рисунков были приняты во внимание известные рекомендации (Geisler, et al, 2007).

Описание цирконов с геохронологическими данными для отдельных пород приведены в ряде работ (Kramm et al., 1983, Чернышев и др., 1987; Крамм и др., 1993; Краснобаев и др., 2010, Недосекова и др., 2014; и др.).

На глубоких горизонтах массива циркон подобен наблюдаемому на поверхности. Распределение циркона по глубине массива неравномерное. Это подтверждается и распределением циркония, содержание которого в породах обусловлено в основном этим минералом (см. рис. 1). Наибольшие содержания приурочены к фенитовому ореолу. Повышенные содержания циркона отмечаются в пироксеновых фенитах, сиенитах, полевошпатовых породах, в полевошпатовых и пироксен-полевошпатовых пегматитах.

Размеры индивидов циркона 0.05–1.5 мм, редко достигают 2–3 мм. Обычно циркон ассоциирует с магнетитом, ильменитом, сфеном, апатитом, изредка – с алланитом и пироксеном. С породообразующими минералами имеет поверхности частичного совместного роста (рис. 4а). Отмечаются также скелетные формы кристаллов (см. рис. 4г). В виде

включений в цирконах наблюдаются породообразующие минералы.

В керне из глубины 399.2 м наблюдается биотит-пироксеновый пегматит у которого в центральной части прослеживается участок агрегата мощностью более 2 см, состоящий из магнетита, циркона и пироксена. Циркон составляет до 15 % объёма агрегата. Цвет цирконов жёлтый, светлорозовый, бурый, жёлто-бурый. Кристаллы циркона призматические, размером 0.2–0.5 мм по оси *c*. На кристаллах преобладает тетрагональная призма {100} и тетрагональная бипирамида {111}. Кроме того, отмечены узкие полоски граней тетрагональной призмы {110} и тетрагональной бипирамиды {331} (Макагонов и др., 2003). В жилке канкринита в биотитовом миаските с глубины 530.5 м обнаружен кристалл циркона величиной 1 см.

Большая часть циркона в миаскитовом массиве без вторичных изменений. Метамиктный циркон более характерен для пород фенитового ореола, в которых отмечаются продукты разложения: гидратированные торогуммит и настуран (см. рис. 4б).

В цирконе постоянная примесь гафния до 3 мас. %. Распределение гафния в цирконах неравномерное как по разрезу массива (см. рис. 1), так и внутри индивидов. Среднее содержание HfO_2 в цирконах

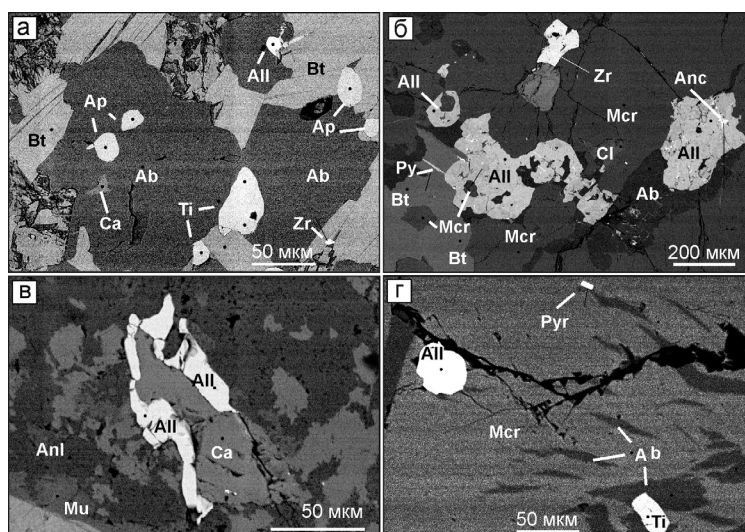


Рис. 5. Форма выделений алланита-(Ce).

а – минеральные ассоциации алланита-(Ce) в сиените; б – алланит-(Ce) с включениями анкилита-(Ce) в сиените; в – прожилки алланита-(Ce) миаските; г – включение алланита-(Ce) в микроклин-пертите. All – алланит-(Ce), Anc – анкилит-(Ce), Anl – анальцит, Ap – апатит, Bt – биотит, Ca – кальцит, Cl – хлорит, Mcr – микроклин, Mu – мусковит, Py – пирит, Pyr – пирротин, Q – кварц, Ti – титанит, Zr – циркон.

Fig. 5. Morphology of allanite-(Ce).

а – assemblage of allanite-(Ce) in syenite; б – allanite-(Ce) with inclusions of ankylite-(Ce) in syenite; в – veins of allanite-(Ce) in miaskite; г – inclusion of allanite-(Ce) in microcline-perthite. All – allanite-(Ce), Anc – ancilite-(Ce), Anl – analcime, Ap – apatite, Bt – biotite, Ca – calcite, Cl – chlorite, Mcr – microcline, Mu – muscovite, Py – pyrite, Pyr – pyrrhotine, Q – quartz, Ti – titanite, Zr – zircon.

уменьшается в последовательности: метаморфиты, фениты, миаскиты, и составляет, соответственно (в мас. %): 2.06, 1.58, 1.30.

В обратно отражённых электронах цирконы часто пятнистые, иногда зональные. Например, в центральной части циркона гафния 1.77 мас. % (см. рис. 4в), а во внешних – 1.37 мас. % (точка 2) и 0.91 мас. % (точка 3). В отдельных зёрнах по всему разрезу массива отмечаются примеси FeO до 0.95 мас. %. Примесь UO_2 до 1.27 мас. % характерна для циркона из фенитов. Ощутимые количества редких земель отмечаются в цирконе из миаскитов на глубине более 1900 м, содержание Y_2O_3 до 0.44 мас. %. Примесь CaO до 0.27 мас. % определена в цирконах из амфиболовых миаскитов в верхней части массива.

Алланит-(Ce) $CaCeAl_2Fe(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$ – распространённый минерал, встречается во вмещающей толще в гнейсах, амфиболитах, плагиогранитных пегматитах. В миаскитовом массиве обнаружен в миаскит-аплитах, миаскитах биотитовых и амфибол-биотитовых, сиенитах биотит-амфиболовых, биотит-полевошпатовых породах с карбонатами.

Алланит-(Ce) обычно образует зёрна чёрного и красно-бурого цвета неправильной формы, местами сдвойникован. Под микроскопом красновато-коричневого и серо-жёлтого цвета, $ng-pr$ 0.027. Во вмещающих породах в пегматоидных прожилках выделения алланита-(Ce) от 10 мкм до 1 см. В сиенитах отмечаются мелкие кристаллики алланита частично с индукционными поверхностями совместного роста (рис. 5а) и более крупные выделения амёбообразных форм, содержащие включения микроклина и выделения анкилита-(Ce) по тонким трещинкам (см. рис. 5б).

В миаскитах алланит-(Ce) ассоциирует с анальцитом, канкринитом, магнетитом, кальцитом, мусковитом, титанитом, цирконом, ильменитом, апатитом. Наблюдается в виде прожилковых выделений между зёрнами породообразующих минералов (см. рис. 5в) и в виде микронных включений в микроклин-пертите более или менее изометричной формы (см. рис. 5г).

В химическом составе алланита-(Ce) из метаморфических пород отмечается повышенное количество Ca (табл. 3). Соотношение La/Ce в отдельных анализах изменяется от 0.20 до 0.95. Стати-

Таблица 3

Химический анализ алланита-Ce (мас. %)

Table 3

Chemical composition of allanite-(Ce) (wt. %)

Компоненты	1	2	3	4	Компоненты	1	2	3	4
SiO ₂	31.10	32.46	31.38	30.42	Na ₂ O	—	—	—	0.45
TiO ₂	—	—	1.99	1.47	La ₂ O ₃	6.10	6.34	10.58	10.53
Al ₂ O ₃	13.96	17.03	10.00	11.33	Ce ₂ O ₃	11.78	9.55	13.25	11.23
FeO	18.08	14.48	17.43	17.43	Pr ₂ O ₃	—	—	1.01	0.65
MnO	1.34	0.80	2.47	1.61	Nd ₂ O ₃	3.42	2.39	2.21	2.08
MgO	—	—	0.56	0.33	ThO ₂	0.99	0.99	0.44	0.88
CaO	11.78	13.06	9.03	9.24	H ₂ O*	1.58	1.61	1.53	1.53
SrO	—	—	—	0.46	Сумма	100.13	98.71	101.88	99.64
Расчётные формулы на 8 катионов									
1 – Ca _{1.00} (Ce _{0.41} La _{0.20} Ca _{0.20} Nd _{0.12} Th _{0.02}) _{0.95} (Al _{1.56} Fe _{1.43} Mn _{0.11}) _{Σ 3.10} Si _{2.95} O ₁₂ (OH); 2 – Ca _{1.00} (Ce _{0.32} La _{0.22} Ca _{0.30} Nd _{0.08} Th _{0.02}) _{Σ 0.94} (Al _{1.86} Fe _{1.13} Mn _{0.06}) _{Σ 3.05} Si _{3.01} O ₁₂ (OH); 3 – Ca _{0.95} (Ce _{0.47} La _{0.38} Nd _{0.08} Pr _{0.04} Th _{0.01}) _{Σ 0.98} (Al _{1.15} Fe _{1.41} Mn _{0.21} Ti _{0.15} Mg _{0.08}) _{Σ 3.00} Si _{3.07} O ₁₂ (OH); 4 – (Ca _{0.97} Sr _{0.03}) _{Σ 1.00} (Ce _{0.40} La _{0.38} Na _{0.09} Nd _{0.07} Mg _{0.05} Pr _{0.02} Th _{0.02}) _{Σ 1.03} (Al _{1.31} Fe _{1.44} Ti _{0.11} Mn _{0.13}) _{Σ 2.99} Si _{2.98} O ₁₂ (OH)									

Примечание. H₂O* – расчёт. 1 – из плагиосланца; 2 – из полевошпат-пироксенового прожилка в амфиболитах; 3–4 – из сиенит-пегматита. Пробы С-2000 с глубины: 1 – 14.4 м; 2 – 25.9 м; 3 – 370.3 м; 4 – 456.2 м. Аналитики: В.А. Котляров (ан. 1–2, РЭММА-202М), В.А. Муфтахов (ан. 3–4, JEOL-733).

Note. H₂O* – calculated. 1 – plagioclase; 2 – feldspar-pyroxene vein in amphibolites; 3–4 – syenite-pegmatite. Sample C-2000 from depth: 1 – 14.4 m; 2 – 25.9 m; 3 – 370.3 m; 4 – 456.2 m. Analysts: 1–2 – V.A. Kotlyarov (an. 1–2, РЭММА-202М), 3–4 – V.A. Muftahov (an. 3–4, JEOL-733).

стически это отношение увеличивается от кровли миаскитового массива к его подошве.

Чевкинит-(Ce) (Ce,La)₄(Fe,Ti)₃(TiO₄)₂Si₂O₇ обнаружен в прослое рихсдоррита (ранее определённого как сиенит), залегающего среди миаскитов на глубине 822.3 м (рис. 6а). Порода среднезернистая, пятнистая. Породообразующие минералы: микроклин, альбит, биотит; второстепенные – анальцит, кальцит, мусковит. Акцессорные минералы: ильменит, магнетит, алланит-(Ce), пирохлор, стронцианит. Чевкинит-(Ce) образует зёрна размером до 50 мкм без кристаллографических ограничений на границе альбита с биотитом. Химический состав отдельных зёрен изменяется незначительно (табл. 4). Наибольшие флуктуации отмечаются для La₂O₃ – до 1.77 мас. %. Отношение La/Ce находится в пределах 0.62–0.71.

Катаплеит Na₂ZrSi₃O₉·2H₂O в виде зерна размером 340×160 мкм обнаружен в крупнозернистом мезократовом миаските на глубине 1898.5 м. Миаскит интенсивно цеолитизирован. Большая часть вмещающей породы представляет собой анальцит-натролитовый агрегат с включениями барита, анкилита; с реликтами микроклина, альбита, нефелина, лепидомелана. Катаплеит располагается

между зёрнами анальцита, биотита и мусковита. Вид линзовидного сечения зерна катаплеита в полированном шлифе подобен поперечному сечению обычных кристаллов этого минерала (см. рис. 6б). Часть индивида катаплеита замещена кальцитом с тонкой вкрапленностью бербанкита. С одной стороны индивид покрыт гематитовой оболочкой, а с другой стороны индивид покрыт мелкими кристалликами ильменита.

По химическому составу ильменский катаплеит практически отвечает крайнему натровому члену с минимальным количеством примесей, в том числе гафния – обычной примеси для катаплеитов (табл. 5). Это отличает его от катаплеитов из других месторождений, в том числе и Вишневогорского (Еськова и др., 1964).

Монголит Ca₄Nb₆Si₅O₂₄(OH)₁₀·nH₂O обнаружен в сиенит-пегматитах в фенитизированной зоне экзоконтакта миаскитового массива (глубины 398.3 и 416.0 м); на Урале найден впервые. Он образует псевдоморфозы по ниобосиликатам, которые образуются пирохлором (см. рис. 6в, г). Макроскопически монголит имеет буровато-жёлтый цвет и жирный блеск и практически неотличим от пирохлора. Монголит – редкий минерал; ранее он был обнару-

Таблица 4

Химический анализ чевкинита-Се (мас. %)

Table 4

Chemical composition of chevkinite-(Ce) (wt. %)

Компоненты	a*)	b	c	d	Компоненты	a	b	c	d
SiO ₂	20.14	19.78	20.12	19.84	SrO	0.95	0.89	—	—
TiO ₂	19.02	18.75	19.64	18.18	La ₂ O ₃	14.99	16.28	14.94	16.71
Al ₂ O ₃	2.58	2.50	3.07	2.96	Ce ₂ O ₃	23.83	23.47	24.2	23.73
FeO	9.05	9.28	8.91	8.66	Pr ₂ O ₃	1.92	1.89	1.82	2.26
MnO	0.36	0.57	0.37	0.52	Nd ₂ O ₃	2.93	2.91	2.54	2.65
CaO	3.33	3.23	3.52	3.49	Сумма	99.10	99.55	99.13	99.00
Расчёт формул на 13 катионов									
$a - (Ce_{1.73}La_{1.10}Ca_{0.71}Nd_{0.21}Pr_{0.14}Sr_{0.11})_{\Sigma 3.99}(Fe_{0.94}Mn_{0.06})_{\Sigma 1.00}(Ti_{2.84}Al_{0.60}Fe_{0.56})_{\Sigma 4.00}Si_{4.00}O_{22};$ $b - (Ce_{1.71}La_{1.19}Ca_{0.69}Nd_{0.21}Pr_{0.14}Sr_{0.10})_{\Sigma 4.04}(Fe_{0.90}Mn_{0.10})_{\Sigma 1.00}(Ti_{2.80}Fe_{0.64}Al_{0.59})_{\Sigma 4.03}Si_{3.93}O_{22};$ $c - (Ce_{1.75}La_{1.09}Ca_{0.74}Nd_{0.18}Pr_{0.13})_{\Sigma 3.88}(Fe_{0.94}Mn_{0.06})_{\Sigma 1.00}(Ti_{2.91}Al_{0.71}Fe_{0.53})_{\Sigma 4.15}Si_{3.96}O_{22};$ $d - (Ce_{1.74}La_{1.23}Ca_{0.75}Pr_{0.16}Nd_{0.19})_{\Sigma 4.07}(Fe_{0.91}Mn_{0.09})_{\Sigma 1.00}(Ti_{2.73}Al_{0.70}Fe_{0.54})_{\Sigma 3.97}Si_{3.97}O_{22}.$									

Примечание. *) – буквы соответствуют рис. 6а. РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров.

Note. *) – letters correspond to those in Figure 6a. Analyst V.A. Kotlyarov.

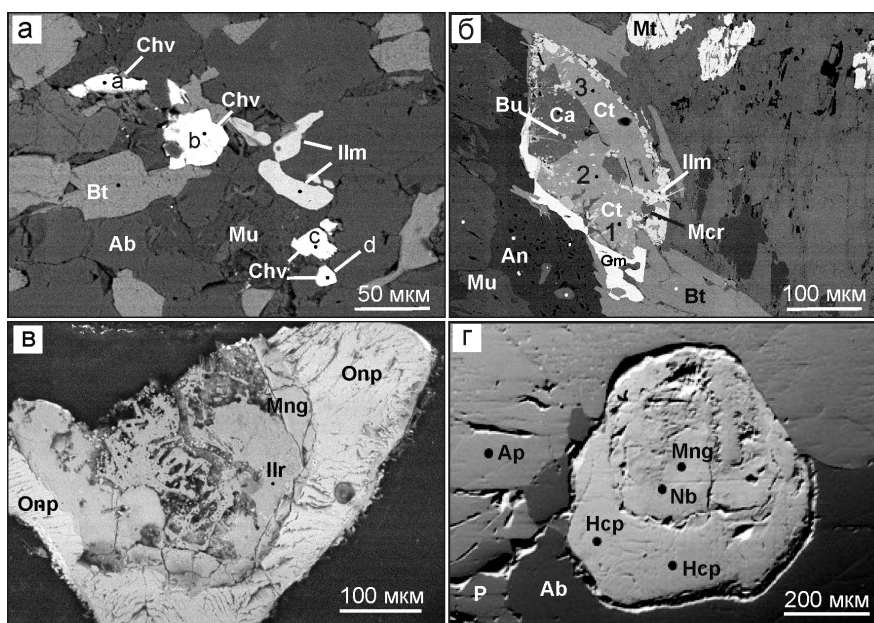


Рис. 6. Форма выделений чевкинита-(Ce), катаплеита и монголита.

а – чевкинит-(Ce) с ильменитом в рисчоррите; б – кристалл катаплеита в миаските; в – монголит в оксинатропирохлоре с ниобиевым рутилом (ильменорутилом); г – монголит в гидроксикальциопирохлоре с силикатом ниобия. Ab – альбит, Ap – апатит, An – анальцим, Bt – биотит, Bu – бербанкит, Ca – кальцит; Chv – чевкинит-(Ce), Ct – катаплеит, Gm – гематит, Hcp – гидроксикальциопирохлор, Ilm – ильменит, Ilr – ниобиевый рутил (ильменорутил), Mng – монголит, Mt – магнетит, Onp – оксинатропирохлор, Nb – силикат ниобия, P – пироксен.

Fig. 6. Morphology of chevkinite-(Ce), catapleiite and mongolite.

а – chevkinite-(Ce) with ilmenite in rischorrite; б – catapleiite crystal in miaskite; в – mongolite in oxynatropyrochlore with Nb rutile (ilmenorutile); г – mongolite in hydroxycalcio-pyrochlore with Nb silicate. Ab – albite, Ap – apatite, An – analcime, Bt – биотит, Bu – burbankite, Ca – calcite, Chv – chevkinite-(Ce), Ct – catapleiite, Gm – gematite, Hnp – hydroxynatropyrochlore, Hcp – hydroxycalcio-pyrochlore, Ilm – ilmenite, Ilr – Nb rutile (ilmenorutile), Mng – mongolite, Mcr – microcline, Mu – muscovite, Nb – niobium silicate, P – pyroxene.

Таблица 5

Химический анализ катаплеита (мас. %)

Table 5

Chemical composition of catapleiite -(Ce) (wt. %)

Компоненты	1*)	2	3	Компоненты	1	2	3
SiO ₂	45.14	45.85	44.72	ZrO ₂	29.77	30.9	29.3
TiO ₂	0.46	0.08	0.39	HfO ₂	0.18	0.47	0.55
FeO	0.60	0.19	0.55	H ₂ O**	8.95	9.11	9.03
CaO	0.23	0.04	0.04	Сумма	100.19	102.06	100.29
Na ₂ O	14.86	15.42	15.71				
Расчётные формулы на 6 катионов							
$(\text{Na}_{1.97}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 1.98}(\text{Zr}_{0.99}\text{Hf}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{Si}_{3.02}\text{O}_9 \cdot 2\text{H}_2\text{O};$ $(\text{Na}_{1.93}\text{Fe}_{0.03}\text{Ca}_{0.02})_{\Sigma 1.98}(\text{Zr}_{0.97}\text{Ti}_{0.02}\text{Hf}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{Si}_{3.02}\text{O}_9 \cdot 2\text{H}_2\text{O};$ $\text{Na}_{2.02}(\text{Zr}_{0.95}\text{Fe}_{0.03}\text{Ti}_{0.02}\text{Hf}_{0.01})_{\Sigma 1.01}\text{Si}_{2.97}\text{O}_9 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$							

Примечание. *) цифры соответствуют рис. 6б. H₂O** – рассчитано на две молекулы воды. РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров.

Note. *) numbers correspond to Fig. 6b. H₂O** is recalculated to two molecules of H₂O. Analyst V.A. Kotlyarov.

Таблица 6

Химический анализ монголита (мас. %)

Table 6

Chemical composition of mongolite (wt. %)

Компоненты	1	2	Компоненты	1	2	Компоненты	1	2
SiO ₂	14.77	12.84	Na ₂ O	0.43	0.12	Nd ₂ O ₃	1.14	0.59
TiO ₂	4.54	4.76	Nb ₂ O ₅	34.81	38.58	Lu ₂ O ₃	–	0.62
Al ₂ O ₃	0.43	0.10	Ta ₂ O ₅	3.27	3.47	ThO ₂	3.09	3.83
FeO	2.3	1.08	Sc ₂ O ₃	–	0.19	UO ₃	2.95	7.68
MnO	1.06	1.4	Y ₂ O ₃	0.67	1.12	PbO	0.36	0.41
CaO	6.68	5.56	La ₂ O ₃	2.23	1.56	P ₂ O ₅	–	0.36
BaO	1.89	1.31	Ce ₂ O ₃	3.12	4.00	H ₂ O*	13.56	10.22
SrO	2.11	2.11	Pr ₂ O ₃	–	0.39	Сумма	99.41	102.30
Расчёт на 15 катионов								
$1 - (\text{Ca}_{2.06}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.33}\text{Na}_{0.24}\text{La}_{0.24}\text{Ba}_{0.21}\text{U}_{0.18}\text{Nd}_{0.12}\text{Th}_{0.20}\text{Y}_{0.10})_{\Sigma 4.02}(\text{Nb}_{4.52}\text{Ti}_{0.92}\text{Ta}_{0.26}\text{Mn}_{0.26}\text{Pb}_{0.03})_{\Sigma 5.98}$ $(\text{Si}_{4.24}\text{Fe}_{0.55}\text{Al}_{0.15}\text{Ti}_{0.06})_{\Sigma 5.00}(\text{OH})_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O};$ $2 - (\text{Ca}_{1.75}\text{U}_{0.47}\text{Ce}_{0.43}\text{Sr}_{0.36}\text{Th}_{0.26}\text{La}_{0.17}\text{Y}_{0.17}\text{Ba}_{0.15}\text{Na}_{0.07}\text{Nd}_{0.06}\text{Lu}_{0.05}\text{Sc}_{0.05}\text{Pr}_{0.04})_{\Sigma 4.03}$ $(\text{Nb}_{5.11}\text{Ti}_{0.20}\text{Ta}_{0.28}\text{Pb}_{0.03}\text{Mn}_{0.35})_{\Sigma 5.97}(\text{Si}_{3.76}\text{Ti}_{0.85}\text{Fe}_{0.26}\text{P}_{0.09}\text{Al}_{0.03})_{\Sigma 5.00}(\text{OH})_{10}$								

Примечание. H₂O* – расчёт по дефициту массы. Пробы С-2000 с глубины: 1 – 398.3 м, 2 – 416.0 м., JEOL-733, аналитик В.А. Муфтахов.

Note. H₂O* – recalculated. Sample C-2000 from depth: 1 – 398.3 м, 2 – 416.0 м. Analyst V.A. Muftakhov.

ружен в кварцевом ядре арфедсонит-эгиринового пегматита в щелочных гранитах Хан-Богдинского массива в Монголии, в которых тонкозернистые агрегаты монголита псевдоморно замещают ниобиевые силикаты (Владыкин и др., 1985; Hawthorne et al., 1986). Второе проявление обнаружено в пегматитовом теле «Кукисвумитовое» в Хибинах в виде мономинеральных псевдоморфоз по ферсманиту (Яковенчук и др., 1999).

По химическому составу ильменский монголит занимает промежуточное положение между монгольским и хибинским монголитами. Главное

его отличие от кукисвумчоррского минерала – это наличие в составе редких земель, но меньше SiO₂ на 2.7–4.7 мас. %, CaO на 2.0–3.2 мас. % и больше Ta₂O₅ на 2.2 мас. %, TiO₂ на 5–5.2 мас. % (табл. 6). Химическое отличие обусловлено составом минералов, замещаемых монголитом.

Заключение

В результате минералогических исследований, проведённых в последнее время, список минералов редких и редкоземельных элементов в щелочных

породах Ильменогорского массива, с учётом карбонатов (Макагонов и др., 2017), дополнился 10-ю минеральными видами и достигает 30 наименований.

Новые данные по составу минералов и их распространению получены в основном при исследовании керна глубинного разреза по структурной скважине С-2000, пробуренной на южном окончании Ильменогорского миаскитового массива. Исследование показывает, что значительная часть редких и редкоземельных элементов в породах массива находится не в рассеянном виде в породообразующих минералах, как считалось ранее (Левин и др., 1997; Еськова и др., 1964), а образует собственные минералы. Распределение описываемых минералов по глубине неравномерное. Повышенные содержания отмечаются в полевошпатовых породах и биотитовых сиенитах, часто содержащих карбонаты в качестве минеральной примеси, в пегматоидных прожилках.

Для большинства этих минералов устанавливается несколько генераций. Часто наблюдаемые прожилковидные выделения минералов редких и редкоземельных элементов, приуроченность их к контактам породообразующих минералов указывают на их образование в поздние этапы формирования пород комплекса. Но для существенной части этих минералов начало кристаллизации было практически одновременным с породообразующими минералами, о чём свидетельствуют индукционные поверхности совместного роста и включения их в породообразующих минералах.

Литература

- Бонштедт-Куплетская Э.М.** (1951) Минералогия щелочных пегматитов Вишнёвых гор. М.: АН СССР, 194 с.
- Владыкин Н.В., Дриц В.А., Коваленко В.И., Дорфман М.Д., Малов В.С., Горшков А.И.** (1985) Новый силикат ниобия – монголит $\text{Ca}_4\text{Nb}_6\text{Si}_5\text{O}_{24}(\text{OH})_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. *Зап. ВМО*, 114(3), 374–377.
- Еськова Е.М., Жабин А.Г., Мухитдинов Г.Н.** (1964) Минералогия и геохимия редких элементов Вишнёвых гор. М.: Наука, 320 с.
- Крамм У., Чернышев И.В., Грауэрт Б., Кононова В.Ф., Брёкер В.** (1993) Типология и U-Pb систематика цирконов: изучение цирконов в нефелиновых сиенитах Ильменских гор, Урал. *Петрология*, 1(5), 536–549.
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Бушарина С.В., Лепехина Е.Н., Медведева Е.В.** (2010) Цирконология амфиболовых миаскитов Ильменогорского массива. *Доклады АН СССР*, 430(2), 227–231.
- Левин В.Я., Роненсон Б.Н., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселев А.П.** (1997) Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Урал-геолком, 274 с.
- Макагонов Е.П., Баженов А.Г., Вализер Н.И., Новокрещенова Л.Б., Плохих Н.А., Варлаков А.С.** (2003) Глубинное строение Ильменогорского миаскитового массива. Миасс: УрО РАН, 180 с.
- Макагонов Е.П., Котляров В.А.** (2017) Карбонаты РЗЭ, Ва, Sr и Na в миаскитах Ильменогорского массива (Южный УРАЛ). *Минералогия*, 3(2), 22–29.
- Макаровичкин Б.А., Еськова Е.М., Александров В.Б.** (1963). О новой редкоземельной разновидности ферсмита. *Доклады АН СССР*, 148(1), 179–182.
- Минералы Ильменского заповедника** (1949). М.–Л.: АН СССР, 660 с.
- Недосекова И.Л., Белоусова Е.А., Беляцкий Б.В.** (2014) U-Pb возраст и Lu-Hf изотопные системы цирконов Ильмено-Вишневогорского щелочно-карбонатитового комплекса, Южный Урал. *Литосфера*, (5), 19–32.
- Попов В.А., Попова В.И.** (2006) Минералогия пегматитов Ильменских гор. *Минералогический альманах*, 9, 156 с.
- Попова В.И.** (1978) Зональность и секториальность состава в кристаллах акцессорного циркона полевошпатовых жил Ильменского заповедника по данным нейтронноактивационной радиометрии / *Материалы к минералогии Южного Урала*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 77–91.
- Попова В.И.** (1995) Нейтронно-активационная радиометрия минералов. Миасс: ИМин УрО РАН, 188 с.
- Халезова Е.Б.** (1963) О типоморфизме циркона из щелочных пород Вишневых и Ильменских гор / *Минералы СССР. Тр. Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана*, 14, 182–199.
- Чернышев И.В., Кононова В.А., Крамм У., Грауэрт Б.** (1987) Изотопная геохронология щелочных пород Урала в свете данных уран-свинцового метода по цирконам. *Геохимия*, (3), 323–338.
- Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Меньшиков Ю.П.** (1999) Минералы Хибинского массива. М.: Земля, 326 с.
- Geisler T., Schaltegger U., Tomashek R.F.** (2007) Re-equilibration of Zircon in Aqueous Fluids and Melts. *Elements*, 3, 43–50.
- Hawthorne F.C., Fleischer M., Grew E.S., Grice J.D., Jambor J.L., Puziewicz J., Roberts A.C., Vanko D.A., Zilczer J.A.** (1986) New mineral names. *American Mineralogist*, 71(9–10), 1277–1282.
- Kramm U., Blaxland A.B., Kononova V.A., Grauert B.** (1983) Origin of the Ilmenogorsk-Vishnevogorsk nepheline syenites, Urals, USSR, and their time of emplacement during the history of the Ural fold belt: a Rb-Sr study. *J. Geol.*, 91, 427–435.

References

- Bonshtedt-Kupletskaya E.M.** (1951) [Mineralogy of alkaline pegmatites of the Vishnevye mountains]. Moscow, USSR Academy of Sciences, 194 p. (in Russian)
- Chernyshev I.V., Kononova V.A., Kramm U., Grauert B.** (1987) [Isotopic geochronology of alkaline rocks of the Urals in the light of data of U-Pb method of zircons]. *Geochimiya [Geochemistry]*, (3), 323–338. (in Russian)
- Es'kova E.M., Zhabin A.G., Mukhitdinov, G.N.** (1964) [Mineralogy and geochemistry of rare elements of the Vishnevye mountains]. Moscow, Nauka, 1964, 320 p. (in Russian)
- Halezova E.B.** (1963) [Typomorphism of zircon from alkaline rocks of the Vishnevye and Ilmeny mountains]. *Mineraly SSSR. Trudy Mineralogicheskogo museya imeni A.E. Fersmana [Minerals of the USSR. Proceedings of Mineralogical Museum them A.E.]*, **14**, 182–199. (in Russian)
- Kramm U., Chernyshev I.V., Grauert B., Konov V.F., Brecker V.** (1993) [Typology and U-Pb systematics of zircons: a study of zircons of nepheline syenites of the Ilmen mountains, Urals]. *Petrologiya [Petrology]*, **1**(5), 536–549. (in Russian)
- Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Budarina S.V., Lepekhina E.N., Medvedeva E.V.** (2010) [Zirconolite amphibole miaskites of the Il'menogorsky massif]. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Doklady Academy of Sciences USSR]*, **430**(2), 227–231. (in Russian)
- Levin V.Ya., Ronenson, B.N., Samkov S.V., Levina I.A., Sergeev N.S., Kiselev A.P.** (1997) [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Yekaterinburg, Uralgeolkom, 274 p. (in Russian)
- Makagonov E.P., Bazhenov, A.G., Valizer N.I., Novokreshchenova L.B., Plokhikh N.A., Varlakov A.S.** (2003) [Deep structure of the Ilmenogorsky miaskite massif]. Miass, UrO RAN, 180 p. (in Russian)
- Makagonov E.P., Kotlyarov V.A.** (2017) [Carbonates of REE, Ba, Sr and Na of the Ilmenogorsky miaskite block (Southern Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **3**(2), 22–29. (in Russian)
- Makarochkin B.A., Es'kova E.M., Alexandrov V.B.** (1963). [New rare-earth variety of fersmite]. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Doklady Academy of Sciences USSR]*, **148**(1), 179–182. (in Russian)
- [Minerals of the Ilmensky reserve]** (1949). Moscow–Leningrad, USSR Academy of Sciences. 660 p. (in Russian).
- Nedosekova I.L., Belousova E.A., Belyatsky B.V.** (2014) [U-Pb age and Lu-Hf isotopic system of zircons of Il'meno-Vishnevogorsky alkaline-carbonatite complex, southern Urals]. *Litosfera [Lithosphere]*, (5), 19–32. (in Russian)
- Popov V.A., Popova I.V.** (2006) [Mineralogy of pegmatites of the Ilmeny mountains]. *Mineralodicheskiy Almanakh [Mineralogical Almanac]*, **9**, 156 p. (in Russian)
- Popova V.I.** (1995) [Neutron activation radiography of minerals]. Miass, IMin URD the Russian Academy of Sciences, 188 p. (in Russian)
- Popova V.I.** (1978) [Zonation and sectorial composition of crystals of accessory zircon and feldspar of the Ilmen yreserve according to neutron diffraction]. In: *Materialy po mineralologii Yuzhnogo Urala [Materials for Mineralogy of the Southern Urals]*. Sverdlovsk, UNTS an SSSR, 77–91. (in Russian)
- Vladykin N.In., Drits V.A., Kovalenko V.I., Dorfman M.D., Malov V.S., Gorshkov A.I.** (1985) [A new silicate of niobium – mongolite $\text{Ca}_4\text{Nb}_6\text{Si}_5\text{O}_{24}(\text{OH})_{10}\cdot n\text{H}_2\text{O}$]. *Zapiski VMO [Proceedings of the All-Union Mineralogical Society]*, **114**(3), 374–377. (in Russian)
- Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Yu., Pakhomovsky Ya.A., Menshikov Yu. P.** (1999) [Minerals of the Hibiny massif]. Moscow, Earth, 326 p. (in Russian)

Поступила в редакцию 2 октября 2017 г.