

**МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
СИЕНИТОВЫХ МИГМАТИТОВ ИЛЬМЕНОГОРСКОГО  
МИАСКИТОВОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

**А.Б. Немов<sup>1</sup>, Е.В. Медведева<sup>1</sup>, В.А. Котляров<sup>2</sup>, И.А. Блинов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
Ильменский государственный заповедник, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия;  
ya.andrew808@yandex.ru

<sup>2</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия

**MINERALOGICAL-PETROGRAPHIC FEATURES  
OF SYENITIC MIGMATITES OF THE ILMENOGORSKY MIASKITE BLOCK  
(SOUTH URALS)**

**A.B. Nemov<sup>1</sup>, E.V. Medvedeva<sup>1</sup>, V.A. Kotlyarov<sup>2</sup>, I.A. Blinov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,  
Ilmeny State Reserve, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; ya.andrew808@yandex.ru

<sup>2</sup>South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,  
Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia

Сиенитовые мигматиты эндоконтакта Ильменогорского миаскитового массива (ИММ) содержат высокие концентрации РЗЭ (более 500 г/т). Их основными минералами-концентраторами являются фторапатит и титанит, присутствующие в лейкоosome. Апатит характеризуется зональностью и секториальностью химического состава: от центра к краю отмечается уменьшение содержаний РЗЭ и Si и увеличение содержаний Ca, P и F, что свидетельствует о смене параметров минералообразования. Соотношения La/Nd в РЗЭ-содержащем фторапатите показывают, что апатит-1 сформировался из F-содержащего флюида, а апатит-2 – из щелочного F–CO<sub>2</sub>–SO<sub>3</sub>-содержащего флюида при альбитизации. Выносимые при щелочном метасоматозе РЗЭ и F концентрировались в поздней РЗЭ-F-содержащей генерации титанита. Мигматизация пород происходила при участии щелочного F–CO<sub>2</sub>–SO<sub>3</sub>-содержащего флюида.

Илл. 4. Табл. 4. Библ. 19.

**Ключевые слова:** сиенитовые мигматиты, щелочной метасоматоз, F–CO<sub>2</sub>–SO<sub>3</sub>-содержащий флюид, РЗЭ-фторапатит, Ильменогорский миаскитовый массив.

Syenitic migmatites of the contact of the Ilmenogorsky miaskite block are characterized by high (>500 ppm) contents of REEs, which are mainly hosted in fluorapatite and titanite of the leucosome. Apatite exhibits zoned and sectorial composition with decreasing REE and Si contents and increasing Ca, P, and F contents from central parts to the margins indicating the change in physicochemical conditions of mineral formation. The La/Nd ratios of REE-bearing fluorapatite indicate that apatite-1 formed from a F-bearing fluid in contrast to apatite-2 formed from an alkaline, F–CO<sub>2</sub>–SO<sub>3</sub>-rich fluid during albitization. The REEs and F released by alkaline metasomatism accumulated in late generation of REE–F-bearing titanite. Migmatization of rocks was accompanied by involvement of an alkaline F–CO<sub>2</sub>–SO<sub>3</sub>-bearing fluid.

Figures 4. Table 4. References 19.

**Key words:** syenitic migmatites, alkaline metasomatism, F–CO<sub>2</sub>–SO<sub>3</sub>-bearing fluid, REE-bearing fluorapatite, Ilmenogorsky miaskite block.

## Введение

В последние годы редкоземельные элементы (РЗЭ) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, что усилило интерес к прогнозированию и поиску месторождений высокотехнологичных элементов. Крупные месторождения РЗЭ связаны с проявлениями щелочного магматизма и продуктами щелочного метасоматоза.

Ильмено-Вишневогорский щелочной комплекс (Южный Урал) широко известен своей РЗЭ минерализацией. РЗЭ в породах комплекса распределены чрезвычайно неравномерно. Наряду с собственными минералами РЗЭ, такими как монацит, алланит, пироклор-(Се), бастнезит и др., значительную роль в качестве минералов-концентраторов РЗЭ играют апатит и титанит. Ранее был описан титанит с повышенными содержаниями РЗЭ из сиенитов (Баженов, Баженова, 1975). Детальное изучение особенностей состава (неоднородность, секториальность, зональность) титанита и апатита из лейкосомы сиенитовых мигматитов позволило оценить направленность процессов их преобразования, влияющих на распределение и перераспределение РЗЭ в этих минералах. Важным фактором для формирования поздней минерализации в породах комплекса является тектонический контроль, связанный со сдвиговыми деформациями. В задачи данной работы входит изучение состава и характера распределения минералов-концентраторов РЗЭ в сиенитовых мигматитах эндоконтакта Ильменогорского миаскитового массива.

## Методы исследования

Текстурно-структурные особенности породы и соотношения минералов в ней были исследованы на микроскопе Olympus BX 51. Редкоземельные и элементы-примеси в породе были определены методом ICP-MS на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7700x (аналитики К.А. Филиппова, М.С. Свиренко). Химический анализ минералов выполнен на растровом электронном микроскопе РЭММА-202 М с энергодисперсионной приставкой LZ Link Systems с Si-Li детектором (аналитик В.А. Котляров). Состав фторсодержащих минералов определен на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega3 sbu с ЭДС Oxford Instruments X-act (аналитик И.А. Блинов). Стандарты: чистые металлы (Micro-analysis consultants LT, LTD, X-RAY microprobe standards, registered standard

number 1362; корунд и  $Y_2O_3$ ) и синтетические (или природные) минералы. Главные элементы эталонировались по апатиту (Ca, P, F), редкие земли (Ce, La и др.) – по монациту, Sr – по целестину. Эталонные шашки: MINM25-53 Mineral Mount serial № 01-044. (Astimex Scientific Limited), № 1362 (Micro-analysis consultants LTD). Режим съемки при разрешении детектора 160 эВ, ускоряющем напряжении 20–30 кВ, силе тока  $3 \cdot 10^{-3}$  А, диаметром пучка 1–2 мкм. Коррекция данных производилась с использованием программы «Magellanes».

## Геологическое положение

Ильменогорский миаскитовый массив (ИММ) входит в состав Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (рис 1а), состоящего из двух подковообразных массивов щелочных пород – ИММ на юге и Вишневогорского миаскитового массива на севере, соединенных Центральной щелочной полосой. Массивы расположены на флангах Кыштымской сдвиговой зоны, протянувшейся в субмеридиональном направлении на 150 км при ширине 2–3 км (Ленных, Вализер, 2006; Русин и др., 2006). Породы массива и вмещающие породы фундамента платформы деформированы с образованием милонитов и протомилонитов амфиболитовой фации динамотермального метаморфизма (Hetzel, Glodny, 2002).

ИММ вытянут с севера на юг ( $18 \times 4.5$  км) и состоит из серии седловидных тел с ассимилированными породами перемычек. Массив имеет опрокинутое на запад залегание и погружается в южном направлении. Восточный и южный контакты пологие, северный и западный – крутые. Залегание всех контактов, кроме северного, совпадает с залеганием вмещающих пород, а их внутреннее строение согласуется с формой массива и структурой обрамляющих толщ. Линейность и полосчатость пород массива повторяют характер текстур вмещающих пород. Северный контакт имеет инъекционную «пилообразную» форму, (Левин и др., 1997; рис 1б).

ИММ имеет сложное неоднородное внутреннее строение. В нем выделяются основное центральное и небольшое восточное линейное тела, сложенные преимущественно биотитовыми миаскитами. Промежуток между ними сложен зоной нерасчлененных щелочных пород (нефелиновые и безнефелиновые сиениты, фениты и др.). Расширяясь в северном направлении, эта зона слива-

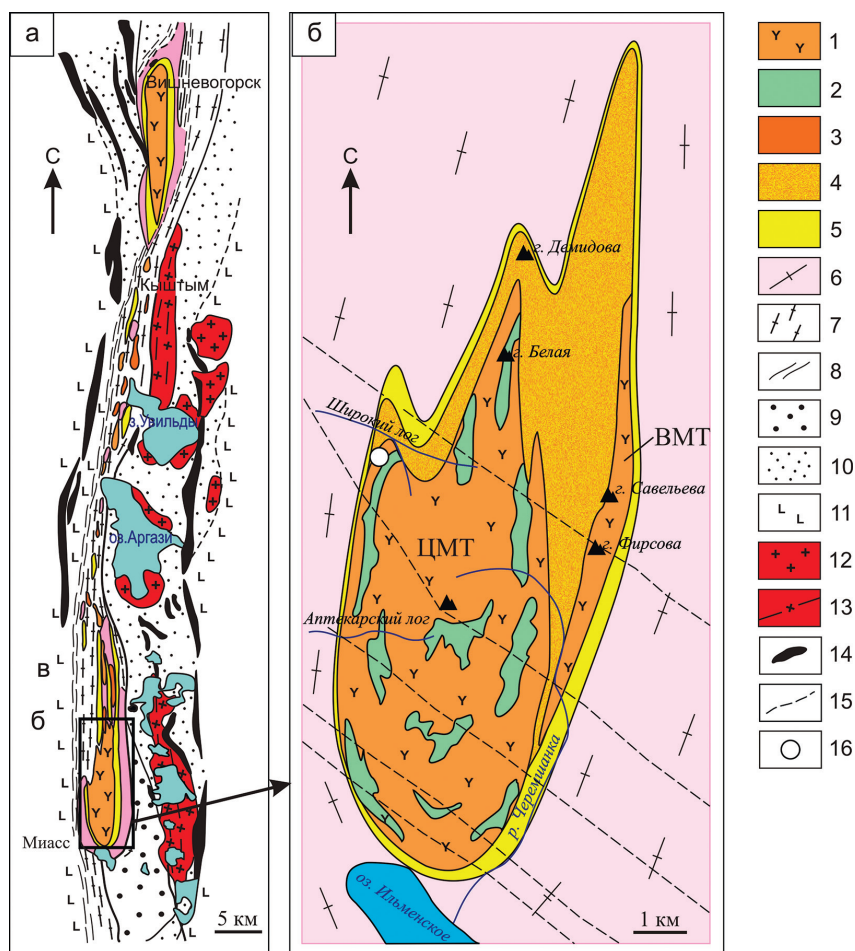


Рис. 1. Схема геологического строения: (а) Ильмено-Вишневогорского полиметаморфического комплекса (Русин и др., 2006); (б) Ильменогорского миаскитового массива (Левин и др., 1997).

Миаскиты ( $O_2$ ): 1 – биотитовые; 2 – амфиболовые, пироксен-амфиболовые и биотит-амфиболовые; 3 – сиениты ( $O_2$ ); 4 – нерасчлененные щелочные породы (миаскиты, сиениты, фениты;  $O_2$ ); 5 – фениты экзоконтактов массива; 6 – селянкинская амфибол-гнейсово-плагиомигматитовая серия (AR–PR<sub>1</sub>); 7 – бластомилониты гранитоидного и сиенитового состава (P<sub>2</sub>–T<sub>1</sub>); 8 – милониты Кыштымского сдвига-надвига; 9 – еланчиковская толща плагиосланцев и мигматитов инъекционного типа; 10 – сайтовская серия, метатерригенная; 11 – зеленосланцевые осадочно-вулканогенные комплексы Западно-Магнитогорской и Арамилско-Сухтелинской зон; 12 – Увильдинский монзонит-гранитный комплекс (PZ<sub>3</sub>); 13 – гнейсовидные граниты Кисегачского комплекса, 14 – метатипербазиты; 15 – тектонические разломы; 16 – точка опробования.

Fig. 1. Schematic geological maps of the Ilmeny-Vishnevogorsky polymetamorphic complex (a) (Rusin et al., 2006) and Ilmenogorsky miaskite block (б) (Levin et al., 1997).

Middle Ordovician miaskites: 1 – biotite; 2 – amphibole, pyroxene-amphibole and biotite-amphibole; 3 – Middle Ordovician syenites; 4 – Middle Ordovician unspecified alkaline rocks (miaskites, syenites, fenites); 5 – fenites at the contact of the block; 6 – Selyankino Group: Archean to Early Proterozoic amphibolite-gneiss-plagiomigmatite rocks; 7 – Middle Permian-Lower Triassic granitic and syenitic blastomylonites; 8 – mylonites of the Kyshtym shear-thrust; 9 – Elanchik Sequence: plagioshales and injection migmatites; 10 – Saitovo Sequence: metaterrigenous rocks; 11 – greenschist volcanosedimentary complexes of the West Magnitogorsk and Aramil-Sukhteli zones; 12 – Late Precambrian Uvildy monzogranitic complex; 13 – gneiss granites of the Kisegach complex; 14 – metagabbro; 15 – faults; 16 – sampling point.

ется с аналогичными зонами обрамления выклинивающихся «языков» щелочных пород северного контакта (Левин и др., 1997). Внутреннее строение Центрального и Восточного тел массива неодно-

родно и характеризуется перемежающимися зонами биотитовых, амфиболовых, промежуточных разностей нефелиновых и безнефелиновых сиенитов, плагиосиенитов, метасоматитов и зон милони-

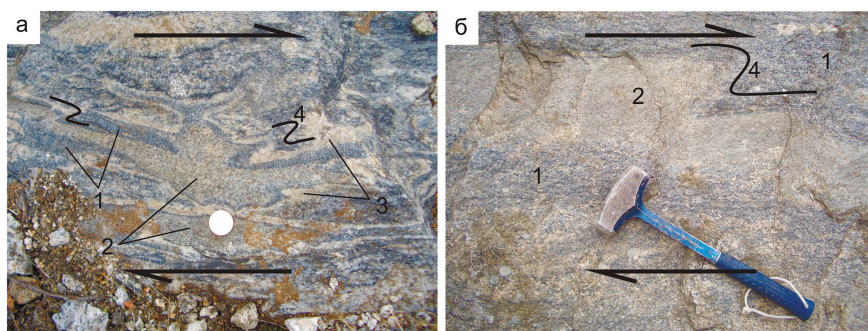


Рис. 2. Строматитовые сиенитовые мигматиты (а, б) эндоконтакта Ильменогорского миаскитового массива и их структурные особенности.

1 – меланосома; 2 – лейкосома; 3 – альбитизация; 4 – Z-образные асимметричные складки. Сдвоенные стрелки – направление сдвига.

Fig. 2. Stromatic syenite migmatites (a, б) at the contact of Ilmenogorsky miaskite block and their structural features.

1 – melanosome; 2 – leucosome; 3 – albitisation; 4 – Z-shaped asymmetric folds. Double arrows indicate shear directions.

тов, развитых по ним, объединенных в единую фацию эндоконтактовых пород массива. Генетически нефелиновые и безнефелиновые сиениты эндоконтакта являются изофациальными. К фации экзоконтакта отнесены фениты и щелочные метасоматиты, сформированные на контакте вмещающих пород и массива. В породах Ильмено-Вишневогорского комплекса широко развиты процессы мигматизации: инъекционно-магматические и метасоматические мигматиты (Кабанова, 2013).

### Объект исследования

В районе эндоконтакта ИММ (старый щебеночный карьер, расположенный в нижней части западного склона Ильменского хребта в 350 м к востоку от п. Строителей, г. Миасс; 55° 04' 45.9" с.ш., 60° 08' 20.5" в.д.) развиты сиенитовые мигматиты с признаками синсдвигового происхождения. Морфологические характеристики мигматитов позволяют отнести их к полосчатым или строматитовым мигматитам (Петрографический..., 2008; Sawyer, 2008). Строматиты образованы совокупностью линейно вытянутых и изогнутых жилоподобных тел мощностью от первых сантиметров до нескольких десятков сантиметров, в которых темные полосы – это меланосома, а светлые – лейкосома. Общий морфологический рисунок осложняется широким развитием мелких складок маркирующих простой правый сдвиг (рис. 2а, б).

Лейкосома имеет светло-серый, местами до молочно-белого цвет, мелко-среднезернистую структуру со слабо выраженной линейной текстурой. Под микроскопом порода обнаруживает гранобластовую, нематобластовую структуры. Минеральный состав лейкосомы: микроклин (60–65 %), кварц (15–20 %), клинопироксен (10–15 %), альбит (5–10 %). Акцессорные минералы (1–3 %): титанит, апатит, рутил, циркон, анкилит-(Ce).

Меланосома характеризуется широким цветовым спектром от кремово-серого до темно-серого цвета, иногда содержит шпирообразные участки лейкосомы. Внутренняя линейно-полосчатая текстура обусловлена чередованием более светлых зон, обогащенных полевыми шпатами, и темных полос, сложенных преимущественно биотитом. Структура меланосомы лепидогранобластовая и порфирикластовая. Наличие порфирикласт полевых шпатов свидетельствует о хрупко-пластичных деформациях (милонитизации) при формировании протомилонита (Trouw et al., 2010). Резкий цветовой контраст между меланосомой и лейкосомой часто подчеркнут каймой биотита. Минеральный состав меланосомы: микроклин (65–70 %), биотит (15–20 %), альбит (10–15 %). Акцессорные минералы (3–5 %): кварц, ильменит, циркон, рутил, монацит-(Ce).

Меланосома характеризуется широким цветовым спектром от кремово-серого до темно-серого цвета, иногда содержит шпирообразные участки лейкосомы. Внутренняя линейно-полосчатая текстура обусловлена чередованием более светлых зон, обогащенных полевыми шпатами, и темных полос, сложенных преимущественно биотитом. Структура меланосомы лепидогранобластовая и порфирикластовая. Наличие порфирикласт полевых шпатов свидетельствует о хрупко-пластичных деформациях (милонитизации) при формировании протомилонита (Trouw et al., 2010). Резкий цветовой контраст между меланосомой и лейкосомой часто подчеркнут каймой биотита. Минеральный состав меланосомы: микроклин (65–70 %), биотит (15–20 %), альбит (10–15 %). Акцессорные минералы (3–5 %): кварц, ильменит, циркон, рутил, монацит-(Ce).

### Петрогеохимический состав меланосомы и лейкосомы

Химический состав (табл. 1) меланосомы соответствует щелочным сиенитам-фойдолитам, а состав лейкосомы – щелочным граносиенитам (Петрографический..., 2008). Для двух составляющих сиенитового мигматита характерны общие тенденции: преобладание К над Na ( $\text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O} = 0.51–0.53$ ) и высокое соотношение  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  (3.4–4.5). Коэффициент агпаитности (0.74–0.83) позволяет отнести их к плюмазитовому ряду. Концентрации

Таблица 1

Химический состав сиенитового мигматита

Table 1

Chemical composition of syenitic migmatites

Мас. %	1	2
SiO <sub>2</sub>	62.82	66.74
TiO <sub>2</sub>	0.35	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.30	14.77
FeO	1.05	0.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.18	1.95
MnO	0.01	0.10
MgO	0.28	0.33
CaO	1.01	1.99
Na <sub>2</sub> O	4.62	4.26
K <sub>2</sub> O	9.04	8.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.18
ППП	0.84	0.37
Σ	99.62	99.57
г/г		
La	28.0	143
Ce	43.7	248
Pr	3.71	23.2
Nd	11.1	72.5
Sm	1.25	8.94
Eu	0.47	1.29
Gd	1.17	5.48
Tb	0.19	0.83
Dy	1.01	3.54
Ho	0.21	0.61
Er	0.68	1.87
Tm	0.12	0.29
Yb	0.80	2.01
Lu	0.12	0.31
ΣREE	92.5	512

Примечание. 1 – меланосома, 2 – лейкосома.

Note. 1 – melanosome, 2 – leucosome.

РЗЭ (табл. 1) в меланосоме значительно ниже, чем в лейкосоме, характерно преобладание ЛРЗЭ над ТРЗЭ – ((La / Lu)n–24) и ((La / Lu)n–47), соответственно.

### Особенности минералогического состава

Состав лейкократовых породообразующих минералов лейкосомы и меланосомы из мигматитов сиенитового состава близки (табл. 2), однако среди

фемических минералов для лейкосомы характерно присутствие пироксена, а для меланосомы – биотита.

**Полевой шпат** представлен микропертитовым микроклином с отчетливой микроклиновой решеткой ( $X_{Na}$  0.03–0.09), замещаемым по периферии альбитом (An 1–3). Альбит также образует самостоятельные индивиды как в меланосоме, так и в лейкосоме.

**Слюда** в меланосоме представлена аннитом ( $f$  57–77 %,  $al$  17–20). Пластинчатые индивиды ориентированы параллельно полосчатости и вытянутым агрегатам альбита (синкинематическая альбитизация). Аннит характеризуется высокими содержаниями Ti (3.77–5.30 мас. %). Для аннита, развитого на контакте меланосомы с лейкосомой, характерно увеличение MgO до 9.75 мас. % и снижение FeO до 22.0 мас. %.

**Пироксен ряда эгирин-диопсид** ( $Di_{55-84}Aeg_{16-37}$  Jd<sub>1-13</sub>, Morimoto, 1988) в лейкосоме образует удлиненные зерна ориентированные субсогласно полосчатости, характеризуется высоким соотношением CaO / MgO 1.5–3.1 и ( $A_1(M_1)$  /  $A_1(T)$  0.5–3.0, содержанием Na<sub>2</sub>O 6.31–10.2 мас. % ( $M_2$ ) при высокой железистости ( $f$  74–87 %) и низкой глиноземистости ( $al$  0.8–2.2).

**Кварц** лейкосомы представлен двумя генерациями. Кварц-1 образует мелкие (<0.005 мм) округлые зерна в сростании с полевыми шпатами и пироксеном. Кварц-2 представлен крупными (>0.1 мм) удлиненными ксеноморфными зернами, содержащими многочисленные флюидные включения, и расположены в межзерновом пространстве между полевыми шпатами. В меланосоме кварц встречается редко в виде небольших (0.1–0.01 мм) ксеноморфных зерен среди полевых шпатов.

**Ильменит** обнаружен только в меланосоме. Для него характерна зональность, выраженная от центра к краю в повышении содержаний TiO<sub>2</sub> (от 49.3 до 54.0 мас. %), MnO (от 5.95 до 19.0 мас. %), и снижении содержаний FeO (от 43.2 до 33.2 мас. %). По составу краевые части зерен ильменита соответствуют марганцовистым разностям (MnO > 13.0 мас. %). Кроме того, по ламелям спайности и трещинам ильменит замещается ксеноморфными агрегатами рутила, ильменорутила и магнетита.

**Ильменорутил** меланосомы имеет широкие вариации содержания TiO<sub>2</sub> (81.5–86.7 мас. %), FeO (11.6–15.7 мас. %) и содержит примеси Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (до 1.10 мас. %), MnO (до 0.80 мас. %).

Таблица 2

## Химический состав породообразующих минералов (мас. %)

Table 2

## Chemical composition of rock-forming minerals (wt. %)

	Ab	Mc	Ann		Ab	Mc	Aeg-Di	
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO <sub>2</sub>	68.57	65.01	32.65	36.89	68.32	64.69	54.55	51.24
TiO <sub>2</sub>	—	—	4.89	4.80	—	—	0.31	0.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.47	18.46	13.39	12.71	19.24	17.89	0.84	1.15
FeO	—	0.22	29.56	22.00	0.56	0.34	21.15	27.27
MnO	—	—	1.00	0.76	—	—	0.81	0.57
MgO	—	—	5.07	9.75	—	—	4.12	2.30
CaO	0.28	—	—	—	—	—	10.97	6.91
Na <sub>2</sub> O	11.45	0.90	—	0.16	11.47	0.86	6.31	8.10
K <sub>2</sub> O	0.21	15.39	8.75	9.29	0.24	15.74	—	—
H <sub>2</sub> O*	—	—	3.68	3.90	—	—	—	—
Σ	99.98	99.98	98.99	100.26	99.83	99.52	99.06	98.06
Формульные коэффициенты								
Si	3.0	3.00	2.66	2.84	3.00	3.00	2.09	1.96
Ti	—	—	0.30	0.28	—	—	0.01	0.01
Al	1.00	1.00	1.29	1.15	0.99	0.98	0.04	0.05
Fe <sup>3+</sup>	—	—	1.82	1.41	—	—	0.23	0.54
Fe <sup>2+</sup>	—	0.01	0.19	—	0.02	0.01	0.45	0.34
Mn	—	—	0.07	0.05	—	—	0.03	0.02
Mg	—	—	0.62	1.12	—	—	0.23	0.13
Ca	0.01	—	—	0.01	—	—	0.45	0.29
Na	0.98	0.08	—	—	0.98	0.08	0.47	0.61
K	0.01	0.91	0.91	0.91	0.01	0.93	—	—
OH*	—	—	2.00	2.00	—	—	—	—
*f	—	—	0.77	0.56	—	—	0.74	0.87

*Примечание.* 1–4 – меланосома, 5–8 – лейкосома. Ab – альбит; Aeg-Di – эгирин-дтопсид; Ann – аннит; Mc – микроклин. Здесь и далее, прочерк – не обнаружено. \*f – коэффициент железистости. Содержание H<sub>2</sub>O\* и OH\* – расчет. СЭМ РЭММА-202, аналитик В.А. Котляров. Формулы минералы рассчитаны на 4 (Aeg-Di), 5 (Ab и Mc) и 8 (Ann) катионов.

*Note.* 1–4 – melanosome, 5–8 – leucosome. Ab – albite; Aeg-Di – aegerine–diopside; Ann – annite; Mc – microcline. Hereinafter, dash – not determined. \*f – iron mole fraction. H<sub>2</sub>O\* and OH\* contents are recalculated. SEM REMMA-202, analyst V. A. Kotlyarov. Formulas of minerals are recalculated to four (Aeg-Di), five (Ab and Mc) and eight (Ann) cations.

**Рутил** в меланосоме и лейкосоме развивается по ильмениту и содержит примеси (меланосома/лейкосома): FeO (3.25 / 1.35 мас. %), Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (2.20 / 2.50 мас. %) и MnO (0.30 / 0 мас. %). В лейкосоме рутил представлен полными псевдоморфозами по ильмениту.

**Монацит-(Ce)** меланосомы содержит высокие концентрации Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (31.1–39.6 мас. %) и La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20.2–31.0 мас. %). Церий преобладает над La (на 100 % ΣREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: La<sub>30–47</sub>Ce<sub>46–57</sub>Pr<sub>3–6</sub>Nd<sub>4–9</sub>). Сумма REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет 66.8–69.0 мас. %. Распределение REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> дифференцировано (La / Nd) 6.2–20.6.

**Титанит** образует удлиненные игольчатые или овальные зерна (0.01–0.06 мм), расположенные в интерстициях полевых шпатов или включенные в пироксен. Часто титанит имеет зональное или секториальное строение (рис. 3а, б), обусловленное

разницей состава ранней (Ttn<sub>1</sub>) и поздней (Ttn<sub>2</sub>) генераций. В позднем титаните (Ttn<sub>2</sub>) фиксируется увеличение содержаний Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>общ.</sub>, CaO, F, REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и уменьшение SiO, TiO<sub>2</sub> и Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (рис. 3а, б; табл. 3, ан. 1–5).

**Фторапатит** (F 2.21–3.72; Pasero et al., 2010) лейкосомы представлен гипидиоморфными зернами, расположенными среди агрегата пироксена, альбита и микроклина. Контакт фторапатита с альбитом часто корродирован. В зернах фторапатита на BSE-снимках (рис. 3в, табл. 4, ан. 1–5) отражается зональность и секториальность в виде светлых (центр Ap<sub>1</sub>) и темных (край Ap<sub>2</sub>) зон. В некоторых кристаллах отмечается обратная зональность, выраженная в расположении темной (Ap<sub>2</sub>) области в центре и светлой (Ap<sub>1</sub>) – на периферии (рис. 3г, табл. 4, ан. 6–9). Харак-

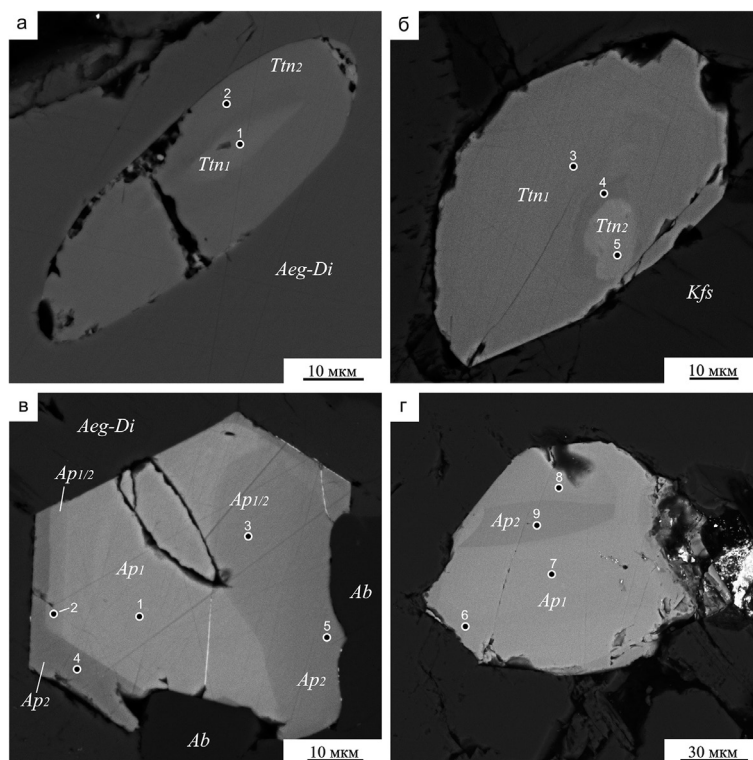


Рис. 3. Акцессорные минералы из лейкосомы мигматитов:

а, б – РЗЭ-F-содержащий титанит; в, г – РЗЭ-содержащий фторапатит, BSE-фото. Цифры на рисунках соответствуют анализам в таблицах.

Fig. 3. Accessory minerals of leucosome of migmatites.

а, б – REE-F-bearing titanite; в, г – REE-bearing fluorapatite, BSE-image. The numbers correspond to the analyses in Tables.

терной особенностью фторапатита являются высокие содержания  $\text{REE}_2\text{O}_3$  и примеси  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ . Отмечается увеличение содержаний  $\text{CaO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , F и уменьшение –  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{REE}_2\text{O}_3$  в присутствии постоянной примеси SrO и следов  $\text{ThO}_2$  (в  $\text{Ap}_1$ ) и  $\text{SO}_3$  (в  $\text{Ap}_2$ , табл. 3) от  $\text{Ap}_1$  к  $\text{Ap}_2$ .

**Анкилит-(Ce)** представлен мелкими (до 0.02 × 0.01 мм) единичными выделениями неправильной формы по краям и трещинам микроклина, часто в ассоциации с титанитом. Он характеризуется высоким содержанием Ce (на 100 %  $\Sigma\text{REE}_2\text{O}_3$ :  $\text{La}_{34}\text{Ce}_{54}\text{Pr}_4\text{Nd}_8$ ). Сумма РЗЭ $_2\text{O}_3$  достигает 67.4 мас. %.

### Обсуждение результатов

Существенная разница концентраций РЗЭ меланосомы и лейкосомы определяется присутствием в лейкосоме минералов-концентраторов РЗЭ – фторапатита и титанита. Присутствие в породе титанита и апатита с высоким содержанием F и минералов ряда эгирин-диопсид с высоким содержанием Ca, Na и Fe указывает на участие в их образовании щелочного флюида. Индукционные поверхности на

границе РЗЭ-содержащего фторапатита и пироксена свидетельствуют об их синхронном образовании. Формирование РЗЭ-содержащего фторапатита и его последующее изменение, выраженное в снижении концентрации РЗЭ, указывает на смену параметров условий минералообразования. Для структурного аналога апатита – бритолита описаны пути изменения химического состава при взаимодействии с флюидом, сопровождающиеся выносом подвижных компонентов (F, Ce, La) и образованием новых минералов, кайм обрастания или формированием секториального строения (Arden, Halden, 1999).

Характер изменения примесных элементов в исследуемом фторапатите можно объяснить рядами гетеровалентных замещений  $\text{REE}^{3+} + \text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{P}^{5+}$  или  $\text{Na}^{+} + \text{REE}^{3+} \rightarrow 2\text{Ca}^{2+}$  (Ronsbo, 1989; Burt, 1989; рис. 4). Присутствие примесных  $\text{Sr}^{2+}$  и  $\text{Th}^{4+}$  объясняется вхождением  $\text{Sr}^{2+}$  в позицию M(I), как и большинства элементов с валентностью +1 и +2, а  $\text{Th}^{4+}$  – в позицию M(II) совместно с элементами с валентностью +3 и +4 по схеме замещения:  $\text{Th}^{4+} + 2\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{P}^{5+}$  (Мельников, Гречановская 2010;

## Химический состав аксессуарных минералов (мас. %)

Таблица 3

## Chemical composition of accessory minerals (wt. %)

Table 3

	Ttn <sub>1(c)</sub>	Ttn <sub>2(r)</sub>	Ttn <sub>1(c)</sub>	Ttn <sub>2(r)</sub>	Ttn <sub>2(r)</sub>	Rt	Anc	Ilm <sub>1(c)</sub>	Ilm <sub>2(r)</sub>	Rt	Zrn	Mnz
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO <sub>2</sub>	31.49	30.87	31.31	31.55	31.10	—	—	—	—	—	33.15	0.31
TiO <sub>2</sub>	35.49	28.61	35.11	29.75	30.06	95.28	—	49.27	43.19	81.48	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.36	2.86	0.41	2.99	2.83	—	—	—	—	—	—	—
FeO	1.98	3.68	1.90	3.16	2.84	1.35	—	42.74	37.00	15.66	—	—
MnO	—	—	—	—	—	—	—	6.34	18.96	0.76	—	—
CaO	25.78	25.13	25.40	26.64	25.32	0.73	1.99	—	—	—	—	0.12
Na <sub>2</sub> O	0.82	0.62	0.77	0.34	0.49	—	—	—	—	—	—	—
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29.66
CO <sub>2</sub> *	—	—	—	—	—	—	26.50	—	—	—	—	—
H <sub>2</sub> O*	—	—	—	—	—	—	8.63	—	—	—	—	—
F	—	0.91	—	0.97	0.89	—	—	—	—	—	—	—
SrO	—	—	—	—	—	—	18.98	—	—	—	—	—
ZrO <sub>2</sub>	—	0.70	—	—	0.36	—	—	—	—	—	65.55	—
HfO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.18	—
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.14	1.40	1.21	1.34	0.68	2.48	—	0.73	—	1.05	—	—
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.44	0.32	—	0.61	0.42	—	—	—	—	—	—	—
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.27	0.44	0.26	—	0.61	—	—	—	—	—	—	—
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	0.56	—	17.27	—	—	—	—	20.17
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.11	2.20	0.89	1.04	1.86	—	21.72	—	—	—	—	39.56
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	0.57	—	—	—	1.58	—	—	—	—	3.04
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0.81	0.61	—	1.06	—	3.22	—	—	—	—	6.23
Σ REE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.38	3.45	2.33	1.04	4.09	—	43.79	—	—	—	—	69.00
Σ	97.81	98.88	98.44	98.39	99.08	99.11	99.89	99.08	99.15	98.95	99.88	99.09
Формульные коэффициенты												
Si	1.04	1.03	1.04	1.04	1.04	—	—	—	—	—	1.01	0.02
Ti	0.89	0.74	0.89	0.74	0.76	0.97	—	0.94	0.82	1.62	—	—
Al	0.01	0.11	0.02	0.12	0.11	—	—	—	—	—	—	—
Fe <sub>tot</sub>	0.06	0.10	0.05	0.10	0.08	0.02	—	0.91	0.78	0.35	—	—
Mn	—	—	—	—	—	—	—	0.14	0.40	0.02	—	—
Ca	0.91	0.90	0.91	0.94	0.91	—	0.15	—	—	—	—	0.01
Na	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	—	—	—	—	—	—	—
P	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.98
CO*	—	—	—	—	—	—	2.00	—	—	—	—	—
OH*	—	—	—	—	—	—	1.17	—	—	—	—	—
H <sub>2</sub> O*	—	—	—	—	—	—	1.00	—	—	—	—	—
F	—	0.10	—	0.10	0.09	—	—	—	—	—	—	—
Sr	—	—	—	—	—	—	0.75	—	—	—	—	—
Zr	—	0.01	—	—	0.01	—	—	—	—	—	0.98	—
Hf	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—
Nb	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	—	0.01	—	0.01	—	—
V	0.01	0.01	—	0.01	0.01	—	—	—	—	—	—	—
Y	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
La	—	—	—	—	0.01	—	0.44	—	—	—	—	0.59
Ce	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	—	0.55	—	—	—	—	1.15
Pr	—	—	0.01	—	—	—	0.04	—	—	—	—	0.08
Nd	—	0.01	0.01	—	0.01	—	0.08	—	—	—	—	0.17
ΣREE	0.02	0.02	0.03	0.01	0.05	—	—	—	—	—	—	1.99

Примечание. 1–7 – лейкосома, 8–12 – меланосома. Anc – анкилит, Ilm – ильменит, Mnz – монацит-(Ce), Rt – рутил, Ttn – титанит, Zrn – циркон. Здесь и далее, с – центр, r – кайма. Содержание Fe<sub>tot</sub> – Fe<sup>2+</sup> + Fe<sup>3+</sup>. H<sub>2</sub>O\*, CO<sub>2</sub>\* и OH\* – расчет. СЭМ РЭММА-202 (ан. 6–12), аналитик В.А. Котляров, и РЭМ Vega 3 Tescan (ан. 1–5), аналитик И.А. Блинов. Минералы рассчитаны на 1 (Rt), 2 (Ilm, Zrn, Anc), 3 (Ttn) и 4 (Mnz) катиона.

Note. 1–7 – leucosome, 8–12 – melanosome. Anc – ancylite, Ilm – ilmenite, Mnz – monazite, Rt – rutile, Ttn – titanite, Zrn – zircon. Hereinafter, c – centre, r – rim. The Fe<sub>tot</sub> – Fe<sup>2+</sup> + Fe<sup>3+</sup>; H<sub>2</sub>O\*, CO<sub>2</sub>\* and OH\* contents are recalculated. SEM REMMA-202 (an. 6–12), analyst V. A. Kotlyarov, and REM Vega 3 Tescan (an. 1–5), analyst I.A. Blinov. Formulas of minerals are recalculated to one (Rt), two (Ilm, Zrn, Anc), three (Ttn), and four (Mnz) cations.

Таблица 4

## Химический состав РЗЭ-содержащего фторапатита (мас. %)

Table 4

## Chemical composition of REE-bearing fluorapatite (wt. %)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Точки	Ap <sub>1(c)</sub>	Ap <sub>1(c)</sub>	Ap <sub>2(r)</sub>	Ap <sub>2(r)</sub>	Ap <sub>2(r)</sub>	Ap <sub>1(c)</sub>	Ap <sub>1(c)</sub>	Ap <sub>1(c)</sub>	Ap <sub>2(r)</sub>
SiO <sub>2</sub>	3.24	3.09	2.61	1.72	3.00	3.20	3.16	2.67	2.36
CaO	46.45	47.39	47.44	49.99	47.93	46.31	46.58	47.08	48.59
Na <sub>2</sub> O	—	0.56	0.51	0.43	0.59	0.55	0.68	0.73	0.60
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	35.11	35.64	36.16	37.83	36.85	34.84	34.87	36.20	37.21
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.02	2.58	2.53	1.58	1.90	2.82	3.05	2.66	2.55
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.18	4.47	4.29	2.49	3.22	5.07	5.23	4.67	4.27
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71	0.75	0.39	—	0.59	0.56	—	0.82	—
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.40	1.33	0.82	0.48	0.75	1.37	1.09	1.63	1.30
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	0.49	0.53	—	—
SrO	1.55	1.94	1.54	2.15	1.85	1.43	1.49	1.33	1.50
ThO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	0.38	—
F	2.86	2.49	3.63	3.55	3.07	2.46	2.49	2.21	2.25
SO <sub>3</sub>	—	—	0.28	0.29	—	—	—	—	—
Σ REE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.31	9.13	8.03	4.55	6.46	10.31	9.90	9.78	8.12
Σ	99.52	100.24	99.92	100.22	99.75	99.10	99.17	100.38	100.63
Формульные коэффициенты									
SiO <sub>2</sub>	0.19	0.17	0.15	0.09	0.17	0.18	0.18	0.15	0.13
CaO	2.85	2.84	2.86	2.94	2.85	2.82	2.83	2.82	2.86
Na <sub>2</sub> O	—	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.70	1.68	1.72	1.76	1.73	1.67	1.67	1.71	1.73
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.05	0.05	0.03	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.09	0.09	0.05	0.07	0.11	0.11	0.10	0.09
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.01	—	0.01	0.01	—	0.02	—
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	0.01	0.01	—	—
SrO	0.05	0.06	0.05	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05
ThO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F	0.52	0.44	0.65	0.62	0.54	0.44	0.45	0.39	0.39
SO <sub>3</sub>	—	—	0.01	0.01	—	—	—	—	—
Σ REE	0.22	0.19	0.17	0.09	0.13	0.21	0.20	0.20	0.16
(La/Nd) <sub>n</sub>	4.14	3.72	5.92	6.31	4.86	3.95	5.37	3.13	3.76

Примечание. SEM Vega 3 Tescan, аналитик И.А. Блинов. Минералы рассчитаны на 5 катионов.

Note. SEM Vega 3 Tescan, analyst I.A. Blinov. Formulas of minerals are recalculated to five cations.

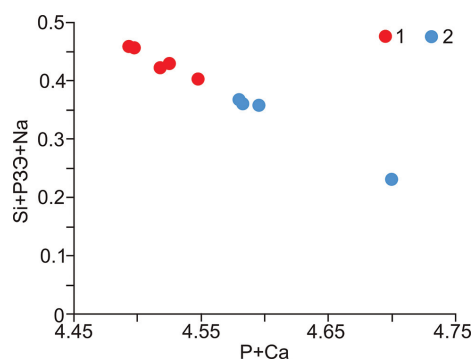


Рис. 4. Зависимость между содержаниями Si + РЗЭ + Na и Ca + P (а.ф.) в центре (1) и крае (2) зерен РЗЭ-содержащего фторапатита.

Fig. 4. Correlation between contents of Si + REE + Na and Ca + P in central (1) and marginal (2) parts of REE-bearing fluorapatite.

Pasero et al., 2010). Отсутствие включений других минералов-концентраторов РЗЭ во фторапатите указывает на изоморфное вхождение в него элементов-примесей.

Для анализа вещественного состава флюида при формировании РЗЭ минералов применяется соотношение La/Nd. Фракционирование La и Nd в РЗЭ минералах зависит от углекислотности минералообразующих растворов (Smith et al., 2000; Зозуля и др., 2015). Значения La/Nd > 4 соответствуют высокоуглекислым флюидам (растворам), La/Nd < 4 – высоководным флюидам. В исследуемом РЗЭ-содержащем фторапатите соотношение La/Nd составляет в центре 3.72–4.14, а в краевой части – 3.13–6.31. Следовательно, на начальных стадиях формирования РЗЭ-содержащего

фторапатита состав флюида/раствора был преимущественно водным, а на позднем этапе – углекислотным.

В редких случаях, краевая часть РЗЭ-содержащего фторапатита имеет низкие отношения La/Nd, что объясняется присутствием ThO<sub>2</sub> (табл. 3, ан. 8) и низкой растворимостью торий-карбонатных комплексов (Зозуля и др., 2015). Сектора и зоны РЗЭ-содержащего фторапатита с высоким соотношением La/Nd содержат примесь SO<sub>3</sub> (табл. 3, ан. 3, 4), что согласуется с высокоуглекислотными флюидами, которые, помимо CO<sub>2</sub>, богаты фтористыми и сернистыми компонентами. На углекислотный режим минералообразования также указывают поздние (развитые по краям и трещинам микроклина) зерна анкилита-(Ce), формирование которого связывают с заключительными стадиями эволюции щелочных процессов с участием растворов водно-углекислого состава (Макагонов, Котляров, 2017).

Следовательно, можно предположить, что состав флюида и его параметры менялись от фторсодержащего высоководного раствора/флюида, при котором формировался РЗЭ-содержащий фторапатит, на существенно углекислотный режим, при котором формировались апатит-2, титанит-2, альбит, кварц-2 и анкилит (Ce).

Развитие позднего ксеноморфного альбита, широкая альбитизация породы, а также замещение ильменита Mn-содержащей разностью в меланосоме свидетельствуют о щелочно-кислотном флюидном преобразовании (Немов, 2017). Формирование сиенитовых мигматитов происходило под влиянием щелочного метасоматоза, который обеспечил перераспределение РЗЭ, а на завершающей стадии режим минералообразования сменился на кислотный.

### Выводы

Сиенитовые мигматиты эндоконтакта ИММ являются метасоматическими и имеют признаки синдвигового происхождения. Помимо редко отмечающихся в мигматите монацита-(Ce) и бастнезита-(Ce), основными минералами-концентраторами РЗЭ являются фторсодержащие апатит и титанит. Мигматизация пород происходила под влиянием высокотемпературного щелочного флюида транспортирующего F и ЛРЗЭ комплексы, обеспечивающего формирование РЗЭ- и F-содержащих апатита и титанита. На последних этапах формирования

минеральной ассоциации щелочной режим сменился кислотным, что способствовало развитию процессов альбитизации.

*Работа выполнена в рамках темы «Геологическое строение южного сегмента зоны Главного Уральского разлома (Южный Урал)» (№ АААА-А17-11780110048-9) при частичной поддержке проекта «Выявление закономерностей дифференциации высокотехнологичных элементов в условиях минералогенеза для разработки критериев поиска и глубокой переработки рудных месторождений» № 18-5-5-48.*

### Литература

- Баженов А.Г., Баженова Л.Ф. (1975) Элементы-примеси в титанитах Ильменогорского щелочного комплекса. *Материалы к минералогии Урала: Труды ИГЗ*, 94–100.
- Зозуля Д.Р., Лялина Л.М., Савченко Е.Э. (2015) Бритолитовые руды Zr–Y–РЗЭ месторождения Сахарйок (Кольский полуостров): геохимия, минералогия и стадийность образования. *Геохимия*, (10), 913–924.
- Кабанова Л.Я. (2013) Мигматиты Ильменогорского комплекса (Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2013. Рудоносность осадочных и вулканогенных комплексов*. Миасс, ИМин УрО РАН, 238–243.
- Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселев А.П. (1997) Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург, Уралгеолком, 274 с.
- Ленных В.И., Вализер П.М. (2006) К геологической схеме Ильменогорского комплекса. *Геология и минералогия Ильменогорского комплекса: ситуация и проблемы*. Миасс, ИГЗ УрО РАН, 20–27.
- Макагонов Е.П., Котляров В.А. (2017) Карбонаты РЗЭ, Ba, Sr и Na в миаскитах Ильменогорского массива (Южный Урал). *Минералогия*, 3(2), 22–29.
- Мельников В.С., Гречановская Е.Е. (2010) Псевдоморфное замещение бритолита Азовского цирконий-редкоземельного месторождения: роль метамиктности и метасоматоза. *Мінералогічний журнал*, 32(3), 11–21.
- Немов А.Б. (2017) Манганоильменит и пирофанит из сиенитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Южный Урал). *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (5), 14–19.
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования (2008). СПб, ВСЕГЕИ, 200 с.
- Русин А.И., Краснобаев А.А., Вализер П.М. (2006) Геология Ильменских гор: ситуация, проблемы. *Геология и минералогия Ильменогорского комплекса: ситуация и проблемы*. Миасс, ИГЗ УрО РАН, 3–9.
- Arden K.M., Halden N.M. (1999) Crystallization and alteration history of britholite in rare earthelementenriched

pegmatitic segregations associated with the Eden Lake complex, Manitoba, Canada. *Canadian Mineralogist*, **37**(5), 1239–1253.

**Burt D.M.** (1989) Compositional and phase relations among Rare Earth Element Minerals. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy*, **21**, 259–307.

**Hetzel R., Glodny J.** (2002) A crustal-scale, orogen-parallel strike-slip fault in the Middle Urals: age, magnitude of displacement, and geodynamic significance. *International Journal of Earth Sciences*, **91**(2), 231–254.

**Morimoto N.** (1988). Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, **39**(1), 55–76.

**Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C., Pekov I.V., Rakovan J., White T.J.** (2010) Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *European Journal of Mineralogy*, **22**(2), 163–179.

**Ronsbo I.Y.** (1989) Coupled substitutions involving REEs and Na and Si in apatites in alkaline rocks from the Ilimaussag intrusion, South Greenland, and the petrological implications. *American Mineralogist*, **74**, 896–901.

**Sawyer E.W.** (2008). Atlas of migmatites. *Canadian Mineralogist, Special Publication*, **9**. NRC Research press, 372 p.

**Smith M.P., Henderson P., Campbell L.S.** (2000) Fractionation of the P3D during hydrothermal processes: Constraints from the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**(18), 3141–3160.

**Trouw R.A.J., Passchier C.W., Wiersma D.J.** (2010) Atlas of mylonites and related microstructures. Springer, 322 p.

**Zozulya D.R., Lyalina L.M., Savchenko E.E.** (2015) Britholite ores of the Sakharjok Zr–Y–REE deposit, Kola Peninsula: Geochemistry, mineralogy, and formation stages. *Geochemistry International*, (10), 892–902.

of displacement, and geodynamic significance. *International Journal of Earth Sciences*, **91**(2), 231–254.

**Kabanova L.Ya.** (2013) [Migmatites of Ilmenogorsky complex (South Urals)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2013. Rudonosnost osadochnykh i vulkanogennykh kompleksov [Metallogeny of ancient and modern oceans-2013. Ore content of sedimentary and volcanic complexes]*. Miass, IMin UrO RAN, 238–243. (In Russian)

**Lennyh V.I., Valizer P.M.** (2006) [Geological scheme of the Ilmenogorsk complex]. In: *Geologiya i mineralogiya Ilmenogorskogo kompleksa: situatsiya i problemy [Geology and mineralogy of Ilmenogorsky complex: situation and problems]*. Miass, IGZ UO RAN, 20–27. (In Russian)

**Levin V.Ya., Ronenson B.M., Samkov V.S., Levina I.A., Sergeev N.S., Kiselev A.P.** (1997) [Alkaline carbonate complexes of the Urals]. Yekaterinburg, Uralgeolkom, 274 p. (In Russian)

**Makagonov E.P., Kotlyarov V.A.** (2017) [REE, Ba, Sr and Na carbonates in miaskites of the Ilmenogorsky massif (South Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **3**(2), 22–29. (In Russian).

**Melnikov V.S., Grechanovskaya E.E.** (2010) [Pseudomorphic replacement of britholite the Azov zirconium-rare-earth deposits: the role of metamict and metasomatism]. *Mineralogichnyi zhurnal [Mineralogical journal]*, **32**(3), 11–21.

**Morimoto N.** (1988). Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, **39**(1), 55–76.

**Nemov A.B.** (2017) [Manganolite and pyrophanite from syenites of the Ilmeno-Vischnevogorsky alkaline complex (South Urals)]. *Vestnik IG Komi NTs UO RAN [Bulletin of the Institute of Geology, Komi Science Center UB RAS]*, (5), 14–19. (In Russian)

**Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C., Pekov I.V., Rakovan J., White T.J.** (2010) Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *European Journal of Mineralogy*, **22**(2), 163–179.

[Petrographic codex of Russian. Igneous, metamorphic, metasomatic, and impact rocks]. 2008. VSEGEI, 200 p.

**Ronsbo I.Y.** (1989) Coupled substitutions involving REEs and Na and Si in apatites in alkaline rocks from the Ilimaussag intrusion, South Greenland, and the petrological implications. *American Mineralogist*, **74**, 896–901.

**Rusin A.I., Krasnobaev A.A., Valizer P.M.** (2006) [Geology of the Ilmeny Mountains: situation, problems]. *Geologiya i mineralogiya Ilmenogorskogo kompleksa: situatsiya i problemy [Geology and mineralogy Ilmenogorsky complex: situation, problems]*, Miass, IGZ UrO RAN, 3–9. (In Russian)

**Sawyer E.W.** (2008). Atlas of migmatites Canadian Mineralogist, Special Publication, **9**. NRC Research press, 372 p.

**Smith M.P., Henderson P., Campbell L.S.** (2000) Fractionation of the REE during hydrothermal processes: Constraints from the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, Inner

## References

**Arden K.M., Halden N.M.** (1999) Crystallization and alteration history of britholite in rare earth element enriched pegmatitic segregations associated with the Eden Lake complex, Manitoba, Canada. *Canadian Mineralogist*, **37**(5), 1239–1253.

**Bazhenov A.G., Bazhenova L.F.** (1975) [Trace elements in titanite of Ilmeny alkaline complex]. *Materialy k mineralogii Urala: Trudy IGZ [Materials on mineralogy of the Urals: Proceedings of Ilmeny State Reserve]*, 94–100. (In Russian)

**Burt D.M.** (1989) Compositional and phase relations among Rare Earth Element Minerals. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy*, **21**, 259–307.

**Hetzel R., Glodny J.** (2002) A crustal-scale, orogen-parallel strike-slip fault in the Middle Urals: age, magnitude

Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**(18), 3141–3160.

**Trouw R.A.J., Passchier C.W., Wiersma D.J.** (2010) Atlas mylonites and related microstructures. Springer, 322 p.

**Zozulya D.R., Lyalina L.M., Savchenko E.E.** (2015) Britholite ores of the Sakharjok Zr–Y–REE deposit, Kola Peninsula: Geochemistry, mineralogy, and formation stages. *Geochemistry International*, (10), 892–902.

*Статья поступила в редакцию 30 сентября 2019 г.*