

УДК 553.9+553.21

DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929

Первые данные о редкоземельной минерализации в кислых разновидностях пород шатакского комплекса (Южный Урал)

С. Г. Ковалев, С. С. Ковалев, А. А. Шарипова

Институт геологии УФИЦ РАН, 450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2, e-mail: kovalev@ufaras.ru

Поступила в редакцию 16.01.2023 г., принята к печати 03.05.2023 г.

Объектом исследования послужили кислые разновидности пород шатакского комплекса. *Материалом исследования* явилась неизвестная ранее обильная минерализация, представленная редкоземельными минералами. *Методы.* Определение концентраций петрогенных оксидов, выполненное рентгенофлуоресцентным методом в ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа) на спектрометре VRA-30 (“Карл Цейсс”, Германия) с использованием рентгеновской трубки с W-анодом (30 кВ, 40 мА). Количество редкоземельных элементов в породах комплекса определялось методом ICP-MS в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Изучение минералогии проводилось на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энергодисперсионным анализатором Xplorer Oxford Instruments (ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа). *Результаты.* Показано, что изученные породы разнообразны по химическому составу, изменяясь от щелочных разновидностей (трахидациты) до низкощелочных риолитов. Установлено, что они относятся к высокоглиноземистому типу, характеризуясь калиевой специализацией и низким коэффициентом апатитности. Предполагается, что в целом кислые разновидности являются субвулканическими образованиями и термин “риолиты” в данном случае характеризует химический состав пород, но не генезис. Количество редкоземельных элементов в породах комплекса подвержено существенным колебаниям, изменяясь от 60.81 до 1625.39 г/т, а их распределение отличается значительной дифференцированностью. В целом породы принадлежат к контрастной базальт-риолитовой серии, а их генезис обусловлен дифференциацией магмы в промежуточном очаге. В породах были обнаружены многочисленные редкоземельные минералы: алланит-(Ce), монацит-(Ce), монацит-(La), ниобозинит-(Y), эшинит-(Y), таленит-(Dy), таленит-(Nd), синхизит-(Ce) и Ce–La–Fe-оксид. *Заключение.* Наличие парагенетических ассоциаций редкоземельных минералов (алланит-(Ce) + эшинит-(Y) + ниобозинит-(Y) и алланит-(Ce) + таленит-(Dy) + таленит-(Nd)) свидетельствует о формировании редкоземельной минерализации в ходе единого процесса. Описанный тип минерализации не имеет аналогов на западном склоне Южного Урала, и его исследование должно быть продолжено.

Ключевые слова: Южный Урал, шатакский комплекс кислые разновидности пород, редкоземельная минерализация, алланит-(Ce), монацит-(Ce), монацит-(La), ниобозинит-(Y), эшинит-(Y), таленит-(Nd), таленит-(Dy), синхизит-(Ce)

Источник финансирования

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-27-00023

First data on rare earth mineralization in acid rock varieties of the Shatak complex (Southern Urals)

Sergey G. Kovalev, Sergey S. Kovalev, Aisylu A. Sharipova

Institute of Geology, UFRS RAS, 16/2 Karl Marx st., Ufa 450077, Russia, e-mail: kovalev@ufaras.ru

Received 16.01.2023, accepted 03.05.2023

Research subject. Acid rock varieties of the Shatak complex were studied. *Materials and methods.* The research object included the previously unknown abundant mineralization represented by rare earth minerals. The concentration of petrogenic oxides was determined by the X-ray fluorescence method at the IG UFRS RAS (Ufa) using a VRA-30 spectrometer (Carl Zeiss, Germany) with an X-ray tube with a W-anode (30 kV, 40 mA). The amount of rare earth elements in the rocks of the studied area was determined by the ICP-MS method at the Central Research Institute of VSEGEI (St. Petersburg). The mineralogy was studied using a Tescan Vega Compact scanning electron microscope equipped with an Xplorer

Для цитирования: Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Шарипова А.А. (2023) Первые данные о редкоземельной минерализации в кислых разновидностях пород шатакского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*, 23(5), 910-929. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>

For citation: Kovalev S.G., Kovalev S.S., Sharipova A.A. (2023) First data on rare earth mineralization in acid rock varieties of the Shatak complex (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, 23(5), 910-929. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>

Oxford Instruments energy-dispersive analyzer (IG UFRC RAS, Ufa). *Results.* The studied rocks were diverse in chemical composition, varying from alkaline varieties (trachydacites) to low-alkaline rhyolites. These rocks belong to a high-alumina type characterized by potassium specialization and a low agpaitic coefficient. It is assumed that the felsic varieties are subvolcanic formations, and the term “rhyolites” in this case characterizes the chemical composition of the rocks, but not their genesis. The amount of rare earth elements in the studied rocks is subject to significant fluctuations, varying from 60.81 g/t to 1625.39 g/t; moreover, their distribution is characterized by significant differentiation. In general, the rocks belong to a contrasting basalt-rhyolitic series, and their genesis is due to the differentiation of magma in the intermediate chamber. Numerous rare-earth minerals were found in the rocks, including allanite-(Ce), monazite-(Ce), monazite-(La), niobaesinit-(Y), aeschinite-(Y), talena-(Dy), talena-(Nd), synchisite-(Ce) and Ce–La–Fe oxide. *Conclusions.* The presence of paragenetic associations of rare-earth minerals, such as allanite-(Ce) + aeschinite-(Y) + niobaeschinit-(Y) and allanite-(Ce) + talena-(Dy) + talena-(Nd), indicate the formation of rare-earth mineralization in the course of a single process. The described type of mineralization has no analogues on the western slope of the Southern Urals, which substantiates the need for further research.

Keywords: Southern Urals, Shatak complex felsic rock varieties, rare earth mineralization, allanite-(Ce), monazite-(Ce), monazite-(La), niobaesinit-(Y), aeschinite-(Y), thalenite-(Nd), thalenite-(Dy), synchisite-(Ce)

Funding information

The research was carried out with the financial support of the RSF grant No. 23-27-00023

Acknowledgements

The authors are grateful to the referees for a detailed review of the work and a fruitful discussion.

ВВЕДЕНИЕ

Шатакский комплекс является частью машакской свиты, распространенной на хребте Бол. Шатак. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных различным аспектам геологического строения комплекса, литологии и петрографии слагающих его пород, а также отдельным вопросам стратиграфии, геохимии и минералогии (Парначев и др., 1986; Пучков, 2000, 2010; Маслов и др., 2004, 2018; Ковалев, Высоцкий, 2006, 2008; и др.), многие проблемы остаются либо дискуссионными, либо практически полностью не освещенными в современной литературе. В частности, не изучены геологическое строение и минералогия кислых разновидностей пород шатакского комплекса. Концентрация внимания в данной работе на редкоземельной минерализации обусловлена тем, что в последнее время минералы редких земель были обнаружены в различных структурно-вещественных комплексах западного склона Южного Урала. Вероятно, одним из первых привлек внимание к этому вопросу А.А. Алексеев (Алексеев и др., 2003; Алексеев, Тимофеева, 2007), который описал редкоземельные фосфаты в породах суранской, юшинской, машакской и зигазино-комаровской свит нижнего и среднего рифея, а также в аллювиальных отложениях водотоков бассей-

на реки Белой на западном склоне Южного Урала. В последнее время информация о площади распространения редкоземельной минерализации в регионе, ее приуроченности к различным петротипам пород и видовом разнообразии существенно увеличилась (Ковалев и др., 2017).

Целью данной работы явилась характеристика нового типа редкоземельной минерализации, обнаруженной в кислых разновидностях пород шатакского комплекса.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение концентраций петрогенных оксидов выполнено рентгенофлуоресцентным методом в ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа) на спектрометре VRA-30 (“Карл Цейсс”, Германия) с использованием рентгеновской трубки с W-анодом (30 кВ, 40 мА). Пределы обнаружения для SiO_2 и Al_2O_3 составляли 0.1% (здесь и далее элементы в мас. %), TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , K_2O , P_2O_5 и $\text{S}_{\text{общ}}$ – 0.01%, MgO – 0.2%. Содержания FeO определялись объемным бихроматным титриметрическим методом.

Концентрации РЗЭ определены методом ICP-MS в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Методика выполнения измерений обеспечивает с вероятностью $P = 0.95$ получение результатов анализа с погрешностью, не превышающей значений, приве-

денных в ОСТ 41-08-214-04 для III категории точности. Анализ подготовленных растворов проводили на приборах ELAN-6100 DRC и Agilent 7700 с использованием компьютерной программы обработки данных TOTALQUANT.

Минералы были изучены на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энергодисперсионным анализатором Xplorer Oxford Instruments (ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа). Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с помощью методики TrueQ. При съемке использованы следующие установки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 4 нА, время накопления спектра в точке 60 с в режиме Point & ID, диаметр пучка составлял 3 мкм. При анализе применялся встроенный комплект эталонов Oxford Instruments Standards, представленный природными и синтетическими соединениями. Формулы минералов рассчитывались по методике (Булах, 1967; Кривовичев, Гульбин, 2022).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ И ГЕОХИМИЯ КИСЛЫХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ПОРОД

Шатакский комплекс расположен в пределах Башкирского мегантиклинория, являясь частью машакской свиты, залегающей в основании среднерифейских отложений стратотипического разреза рифея. Среднерифейский возраст пород основан на инструментальном определении возраста циркона из базальтоидов различными методами: методом CA-TIMS (CA-ID-TIMS) по отношениям $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – 1380.6 ± 1.1 млн лет (MSWD = 0.1) и 1380.1 ± 0.5 млн лет (MSWD = 2.0) (Пучков, 2010).

В структурном отношении комплекс локализован на восточном крыле Ямантауского антиклинория, слагая моноклиналь, осложненную дизъюнктивными нарушениями и мелкой складчатостью, где его отложения перекрывают юшинскую свиту нижнего рифея, сменяясь зигальгинскими кварцевыми песчаниками и кварцитопесчаниками. На хр. Бол. Шатак машакская свита представлена осадочными (конгломератами, полимиктовыми песчаниками, алевролитами и углеродисто-глинистыми сланцами), магматическими (пикритами, базальтами, дацитами, риодацитами и риолитами) и вулканогенно-осадочными (туфами и туфобрекчиями) породами (рис. 1).

Кислые разновидности пород приурочены к верхней части нижней кузьелгинской подсвиты машакской свиты (см. рис. 1). Нами они изучались в естественном обнажении (табл. 1, обр. 15ш-3–15ш-8) и по разрезу скважины (см. табл. 1, обр. 1/12–1/39). В обоих случаях визуально породы представлены однородной толщей с переменным количеством порфировидных выделений полевых шпатов. При петро-

графическом изучении среди них выделены дациты, риодациты и риолиты. Дациты и риодациты – светло-серые породы мелко-среднезернистой, порфировидной структуры массивной текстуры. Минеральный состав включает амфибол (редко), плагиоклаз (альбит), микроклин (редко), кварц, серицит, хлорит, биотит, рудный минерал, титанит и лейкоксен. Редкие кристаллы амфибола псевдоморфоно замещены карбонат-серицит-хлоритовой ассоциацией. Вкрапленники альбита (и редко микроклина) наблюдаются в удлиненно-призматических кристаллах и изометричных выделениях размером 0.25–5.00 мм, часто образующие гломеропорфировые сростки (рис. 2). Основная масса пород сложена мелкими зернами кварца, хлорита и биотита. Риолиты – светло-серые породы с порфировидной флюидалльной и шлирово-такситовой структурой. Основная масса сложена мелкозернистым кварцевым агрегатом и тонкошелушчатый серицитом. В порфировых выделениях встречается альбит. Темноцветные минералы представлены зеленовато-бурым биотитом и хлоритом. В качестве аксессуаров встречаются рудный минерал, апатит, алланит, титанит, циркон.

По химическому составу кислые породы шатакского комплекса разнообразны и изменяются от щелочных разновидностей (трахидацитов) до низкощелочных риолитов (рис. 3а, табл. 1). Для большей части из них характерна калиевая специализация ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ изменяется от 0.32 до 18.52), по коэффициенту глиноземистости (al') породы относятся к высокоглиноземистому типу. Низкий коэффициент апаитности (K_a – 0.31–0.63) свидетельствует о том, что практически все количество калия и натрия входит в состав полевых шпатов.

Количество редкоземельных элементов (РЗЭ) в породах комплекса подвержено существенным колебаниям, изменяясь от 60.81 до 1625.39 г/т (табл. 2). Распределение РЗЭ характеризуется значительной дифференцированностью (см. рис. 3б, в, табл. 2). Так, степень фракционирования РЗЭ колеблется в очень широких пределах: La_n/Lu_n – от 3.55 до 12.89 (максимально до 112.23), Ce_n/Yb_n – от 2.07 до 6.39 (максимально до 66.09). При этом фракционирование легкой группы (La_n/Sm_n) варьирует от 3.33 до 4.61, а тяжелой (Gd_n/Yb_n) – от 0.79 до 1.44 (максимально до 9.53). Кроме того, породам присущи вариации концентраций крупноионных (Cs, Rb, Ba, Sr), менее выраженные – высокозарядных элементов (Th, U, Nb), а также европиевый и стронциевый минимумы.

Формационная принадлежность кислых разновидностей пород шатакского комплекса к контрастной базальт-риолитовой серии (Парначев и др., 1986), как и их генетическая природа (результат дифференциации магмы в промежуточном очаге (Ковалев и др., 2018а)), не вызывает возражений.

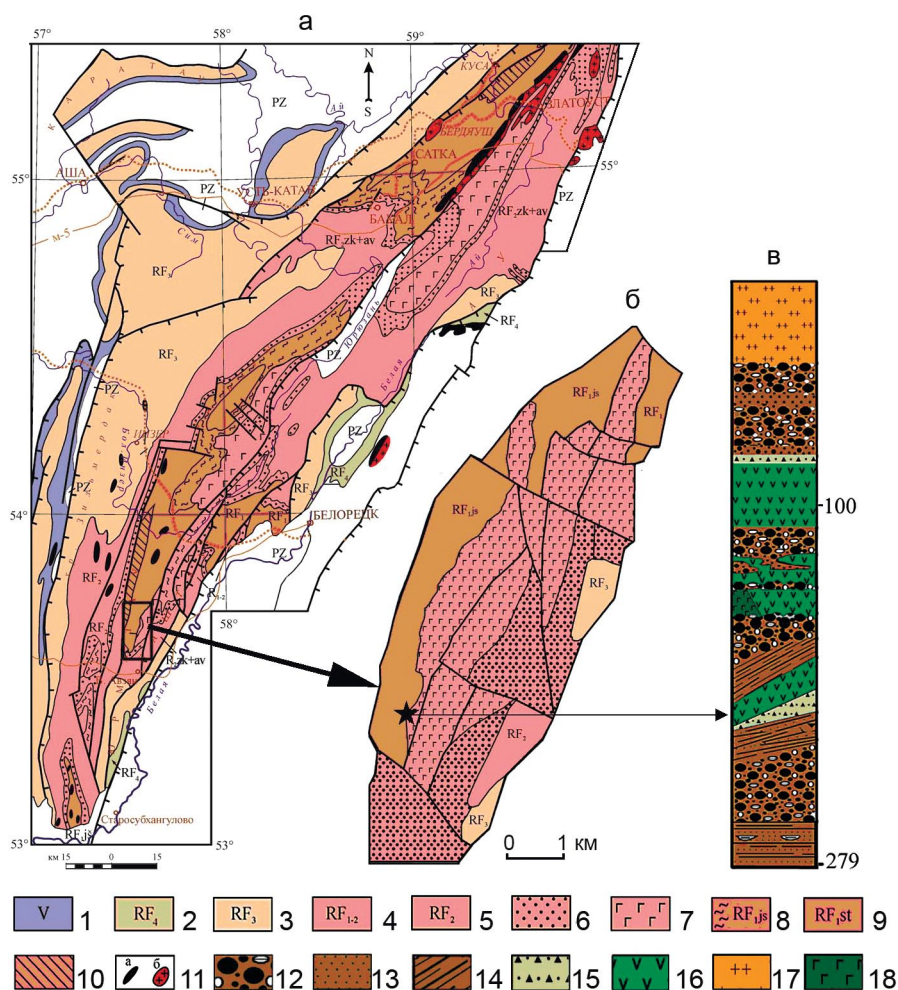


Рис. 1. Геологическая схема Башкирского мегантиклинория (а) шатакского комплекса (б) и разрез кузьелгинской подсвиты (в).

PZ – нерасчлененные отложения палеозоя; 1 – венд; 2 – завершающий рифей (аршиний); 3 – верхний рифей; 4 – нижний и средний рифей Маярдаского антиклинория; 5 – нерасчлененные отложения зигазино-комаровской и авзянской свит; 6 – зигальгинская свита; 7 – машакская свита; 8 – бакальская и юшинская свиты; 9 – саткинская и суранская свиты; 10 – айская и болшеинзерская свиты; 11 – габбро-долериты (а), граниты (б); 12 – конгломераты; 13 – песчаники; 14 – алевросланцы; 15 – туфы, туфопесчаники; 16 – базальты; 17 – дациты, риодациты, риолиты; 18 – габбродолериты.

Fig. 1. Geological scheme of the Bashkir meganticlinorium (a) of the Shatak complex (b) and section of the Kuz'elga subformation (v).

PZ – undivided Paleozoic deposits; 1 – Vendian; 2 – the final Riphean (arshinium); 3 – Upper Riphean; 4 – lower and middle Riphean Mayardak anticlinorium; 5 – undivided deposits of the Zigazino-Komarov and Avzyan formations; 6 – Zigalga Formation; 7 – Mashak Formation; 8 – Bakal and Yusha formations; 9 – Satka and Suran suites; 10 – Ai and Bolsheinzersk formations; 11 – gabbro-dolerites (a), granites (b); 12 – conglomerates; 13 – sandstones; 14 – silty schists; 15 – tuffs, tuff sandstones; 16 – basalts; 17 – dacites, rhyodacites, rhyolites; 18 – gabbrodolerites.

В рифейской истории западного склона Южного Урала среднерифейский этап являлся временем максимального развития магматизма на обширной территории преимущественно в интрузивной форме. Более того, “машакское магматическое событие” в виде вулканитов, дайковых роев и глубинных интрузий распространилось далеко за пределы Башкирского мегантиклинория (Восточно-Европейская платформа, Тиман, Гренландия, Сибир-

ский кратон) и представляло собой событие субглобального масштаба, свидетельствующее о его плюмовой/суперплюмовой природе (Puchkov et al., 2013; Ernst, 2014). Геолого-петрологические условия формирования пород комплекса условно можно подразделить на несколько этапов (Ковалев и др., 2018а).

1 этап. Поступление недифференцированно-го мантийного вещества при подъеме плюма и на-

Таблица 1. Химический состав кислых разновидностей пород шатакского комплекса, мас. %**Table 1.** Chemical composition of acid varieties of rocks of the Shatak complex, wt %

Компонент	№ обр.										
	15ш-3	15ш-4	15ш-5	15ш-6	15ш-7	15ш-8	1/2	1/12	1/15	1/25	1/39
SiO ₂	62.99	63.2	70.26	62.47	63.91	74.58	69.06	63.72	70.71	70.38	67.55
TiO ₂	0.81	0.62	0.36	1.80	0.80	0.12	0.58	0.70	0.62	0.59	0.80
Al ₂ O ₃	15.76	14.16	11.42	15.76	15.76	14.00	11.93	13.12	12.08	12.28	12.27
Fe ₂ O ₃	3.39	1.33	2.60	2.43	2.70	2.00	3.90	5.70	3.66	2.99	2.85
FeO	3.59	7.04	3.45	5.17	2.15	2.15	4.33	6.34	4.07	3.32	3.16
MnO	0.04	0.08	0.03	0.05	0.02	0.01	0.07	0.10	0.06	0.07	0.03
Mg	4.00	5.40	3.00	4.00	4.00	1.60	2.97	2.93	2.23	2.29	2.60
CaO	0.85	0.85	0.51	0.85	0.85	0.56	0.42	0.37	0.26	0.75	0.23
Na ₂ O	0.54	0.54	0.27	0.55	3.00	1.35	3.80	2.67	2.65	3.32	0.51
K ₂ O	5.00	3.80	5.00	5.00	4.10	3.25	1.20	2.10	2.70	3.15	7.27
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.14	0.17	0.15	0.05	0.22	0.17	0.14	0.14	0.11
П.п.п.	3.30	2.88	2.94	2.50	1.71	0.64	1.59	2.75	1.57	1.29	3.13
Сумма	100.37	99.51	99.98	99.95	99.05	100.21	100.07	100.69	100.74	100.57	100.52
K ₂ O/Na ₂ O	9.26	7.04	18.52	9.09	1.37	2.41	0.32	0.79	1.02	0.95	14.27
al	1.44	1.03	1.26	1.36	1.78	2.43	1.07	0.88	1.21	1.43	1.42
K _a	0.35	0.31	0.46	0.35	0.45	0.33	0.42	0.36	0.44	0.53	0.63

чинающийся рифтогенный процесс активного типа приводят к внедрению расплава в верхние горизонты коры. P - T -условия расплава в промежуточном очаге, реконструированные по составу оливина и клинопироксена пикритов шатакского комплекса (Loucks, 1996; Hoog et al., 2010), соответствовали $T = 1100^\circ\text{C}$, $P = 10$ – 11 кбар. Геологическое строение комплекса, а именно наличие базальтов и риолитов в кузьелгинской подсвите и базальтов – в казавдинской, калпакской и каранской подсвитах, различающихся по времени излияния, позволяет предполагать существование нескольких взаимосвязанных промежуточных очагов. Эволюция расплава в промежуточных камерах/очагах определялась, по нашему мнению, действием AFC-процесса (Paolo, 1981), который характеризовался фракционированием ликвидусных фаз (оливин $\pm$ клинопироксен) и накоплением флюидной фазы в прикровельной части камеры/очага с одной стороны и ассимиляцией вмещающих пород с другой. Реальность действия AFC-процесса доказывается наличием пикритов как продуктов фракционирования оливина и клинопироксена, а также эволюцией Sm–Nd-системы в магматических породах, свидетельствующей об ассимиляции расплавом архейских и палеопротерозойских пород.

2 этап. Происходит излияние базальтов кузьелгинской подсвиты. Потоки формировались в прибрежной зоне через аппараты центрального типа, о чем свидетельствуют находки палеовулканиче-

ских построек (Парначев и др., 1986). Вероятнее всего, некоторая часть базальтов внедрилась в слаболитифицированные либо нелитифицированные осадки, что может объяснить отсутствие окатанного материала базальтового состава в конгломератах кузьелгинской подсвиты. После излияния базальтов кузьелгинской подсвиты внедряются риолиты. Обогащенность магмы летучими компонентами приводит к метаморфизму уже сформированных магматических образований шатакского комплекса, о чем свидетельствует Rb–Sr-эрахронный возраст магматических пород – 1376 ± 31 млн лет и Sm–Nd-эрахронный возраст риолитов – 1371 ± 110 млн лет. Сразу после риолитов изливаются базальты казавдинской подсвиты. Нельзя исключить того, что эти базальты являются дериватом того же локального магматического очага, что и кузьелгинские базальты, а риолиты представляют собой субвулканические тела, сформировавшиеся несколько позже.

3 этап. Характеризуется затуханием магматизма. В этот период формируются песчано-сланцевые толщи быковской подсвиты.

4 этап. Происходит излияние основной массы базальтов шатакского комплекса. Примечательно, что процесс носит дискретный характер; фазы активного вулканизма (калпакская, каранская подсвиты) сменяются накоплением песчано-сланцевого материала (куянтавская, шакитарская подсвиты) без видимых проявлений магматизма.

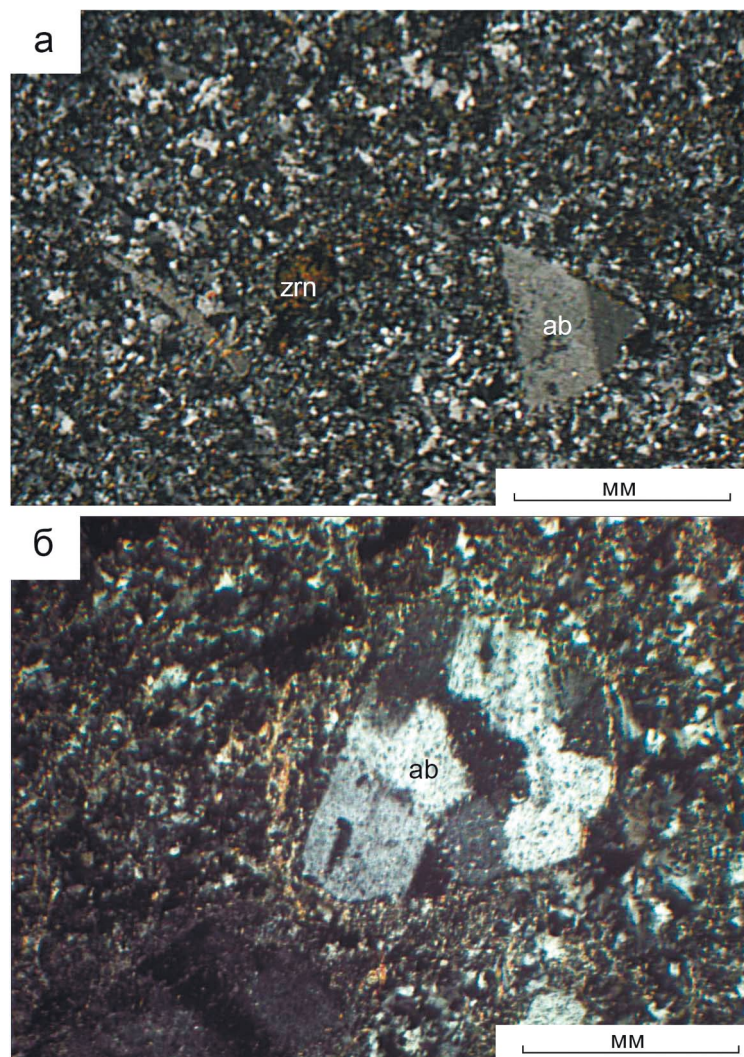


Рис. 2. Микрофотографии кислых разновидностей пород шатакского комплекса.

а – риолит, б – риодацит; *ab* – альбит, *zrn* – циркон.

Fig. 2. Photomicrographs of felsic rocks of the Shatak complex.

а – rhyolite, б – rhyodacite; *ab* – albite, *zrn* – zircon.

РЕДКОЗЕМЕЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ

В результате детального изучения минералогии кислых разновидностей пород шатакского комплекса были обнаружены многочисленные редкоземельные минералы: алланит-(Ce), монацит-(Ce), монацит-(La) ниобозинит-(Y), эшинит-(Y), таленит-(Nd), таленит-(Dy), синхизит-(Ce), неидентифицированные соединения: Ce–La–Fe-оксид и соединение Ce–Fe, характеристика которых приводится далее.

Алланит-(Ce) – самый распространенный минерал в кислых разновидностях пород шатакского комплекса. Он встречается в слабо ограненных кристаллах призматического габитуса (см. рис. 3а, б), ксеноморфных выделениях, звездчатых срастани-

ях (рис. 4в) и ветвящихся прожилковидных обособлениях (см. рис. 4). Размеры отдельных кристаллов достигают величины 250×400 мкм, а прожилков – до нескольких миллиметров. По химическому составу практически все алланиты относятся к цериевой разновидности $\text{Ce}_2\text{O}_3 \geq \text{La}_2\text{O}_3 + \text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{Pr}_2\text{O}_3 + \text{Nd}_2\text{O}_3$ (табл. 3).

Средний химический состав, рассчитанный на основе более чем 150 измерений, соответствует: La_2O_3 – 5.40, Ce_2O_3 – 11.84, Pr_2O_3 – 1.37, Nd_2O_3 – 4.27, Sm_2O_3 – 0.84. В качестве примесей в минерале установлены, мас. %: титан – 2.91–3.74, магний – 0.5–0.97, скандий – 0.19–0.31, в единичном случае гадолиний – 0.46. Для большей части кристаллов характерна слабо выраженная зональность,

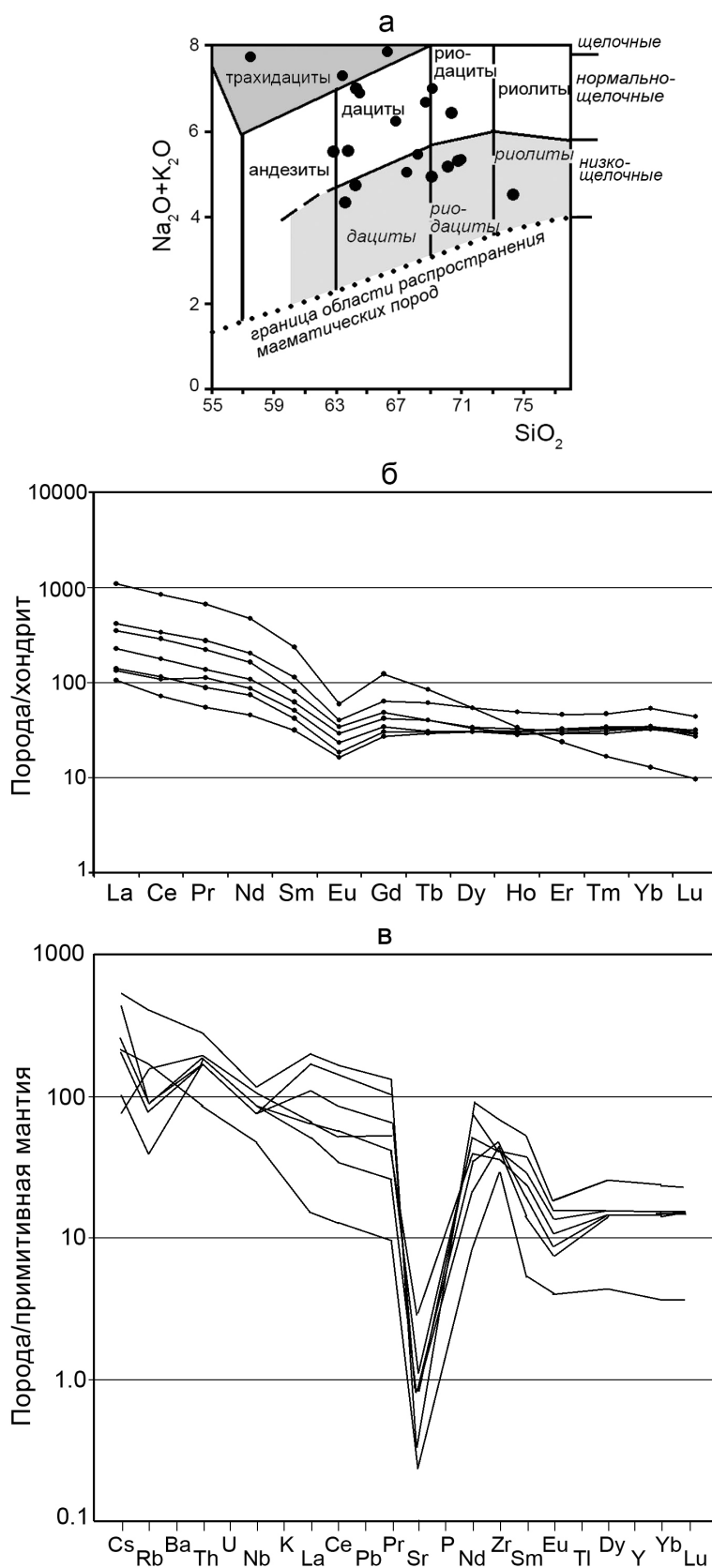


Рис. 3. Диаграммы $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (а) и нормализованных содержаний РЗЭ (б, в) в кислых разновидностях пород шатакского комплекса.

Хондрит и примитивная мантия, по (McDonough, Sun, 1995).

Fig. 3. Diagrams of $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (a) and normalized REE contents (б, в) in acid varieties of rocks of the Shatak complex.

Chondrite and primitive mantle after (McDonough, Sun, 1995).

Таблица 2. Содержания редкоземельных элементов в кислых разновидностях пород шатакского комплекса, г/т

Table 2. Contents of rare, incoherent and rare earth elements in acid varieties of rocks of the Shatak complex, g/t

Компонент	№ обр.						
	1/2	1/12	1/15	1/25	1/39	15ш-3	15ш-8
La	35.00	45.90	116.00	75.10	138.00	359.33	10.31
Ce	62.30	101.00	253.00	154.00	294.00	736.99	22.58
Pr	7.18	11.50	29.00	18.00	35.80	87.35	2.64
Nd	28.70	47.00	104.00	68.20	130.00	300.78	10.91
Sm	6.48	8.55	16.50	12.80	23.30	48.09	2.39
Eu	1.27	1.44	2.65	2.27	3.10	4.60	0.68
Gd	7.55	8.43	13.50	11.70	17.70	33.91	2.77
Tb	1.48	1.52	2.03	2.00	3.10	4.23	0.49
Dy	10.40	10.60	11.50	11.70	18.80	18.71	3.16
Ho	2.33	2.41	2.25	2.54	3.79	2.60	0.66
Er	7.38	7.39	6.74	7.03	10.50	5.42	1.88
Tm	1.17	1.20	1.09	1.15	1.65	0.59	0.28
Yb	7.64	7.56	7.45	7.13	11.70	2.84	1.79
Lu	1.02	1.08	0.93	0.99	1.51	0.33	0.27
Σ РЗЭ	179.90	255.58	566.64	374.61	692.95	1625.39	60.81

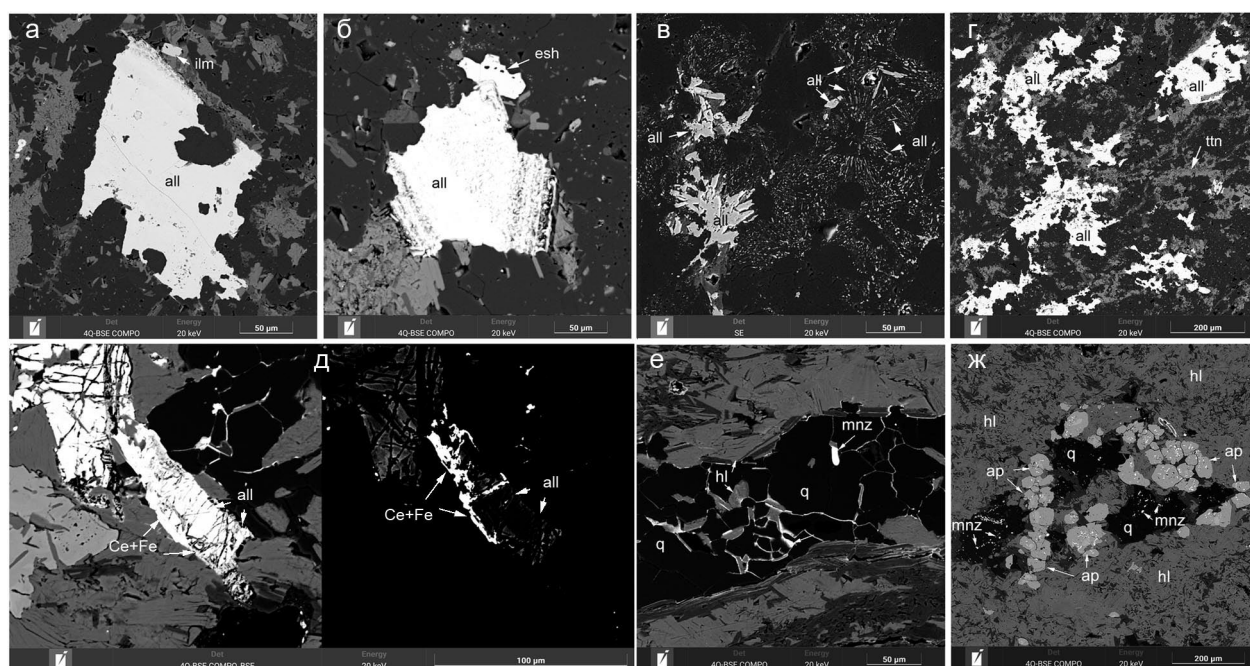


Рис. 4. Микрофотографии алланита (а–д) и монацита (е–ж) из кислых разновидностей пород шатакского комплекса.

all – алланит, *mnz* – монацит, *ap* – апатит, *ilm* – ильменит, *ttn* – титанит, *hl* – хлорит, *q* – кварц, *esh* – эшенит, *Ce + Fe* – не-идентифицированное соединение.

Fig. 4. Microphotographs of allanite (a–d) and monazite (e–j) from felsic rocks of the Shatak complex.

all – allanite, *mnz* – monazite, *ap* – apatite, *ilm* – ilmenite, *ttn* – titanite, *hl* – chlorite, *q* – quartz, *esh* – eschenite, *Ce + Fe* – unidentified compound.

Таблица 3. Репрезентативная выборка химического состава алланита из риолитов шатакского комплекса, мас. %**Table 3.** Representative sample of the chemical composition of allanite from rhyolites of the Shatak complex, wt %

Компонент	№ обр.										
	115-1	115-11	115-12	115-31	115-33	115-34	115-36	115-37	115-43	115-75	115-80
SiO ₂	31.88	32.68	31.65	31.53	32.02	32.05	32.16	31.64	31.97	32.98	33.07
Al ₂ O ₃	16.67	16.61	16.85	16.85	16.20	16.14	16.45	16.62	16.03	17.33	18.86
CaO	10.19	11.16	10.65	11.23	11.00	11.20	11.05	11.00	11.19	10.73	11.65
FeO	15.86	15.31	16.10	15.51	15.41	15.98	15.40	16.06	16.25	15.91	15.41
La ₂ O ₃	5.88	6.18	5.75	5.39	6.20	4.75	5.74	5.20	4.47	5.36	4.45
Ce ₂ O ₃	12.95	13.03	12.69	12.10	13.06	12.67	12.80	12.43	12.06	12.90	13.02
Pr ₂ O ₃	1.59	1.53	1.56	1.62	1.28	1.77	1.44	1.64	1.78	1.32	–
Nd ₂ O ₃	4.51	4.25	4.41	4.91	4.14	5.38	4.36	4.72	5.07	4.27	2.96
Sm ₂ O ₃	0.80	–	0.85	1.16	–	0.66	–	0.87	0.91	–	–
Сумма	100.33	100.75	100.51	100.30	99.31	100.60	99.40	100.18	99.73	100.80	99.42
Кристаллохимические коэффициенты											
Si	3.00	3.03	2.96	2.95	3.02	2.99	3.02	2.96	3.00	3.04	3.00
Al	1.85	1.82	1.86	1.86	1.80	1.78	1.82	1.83	1.77	1.88	2.02
Ca	1.03	1.11	1.07	1.13	1.11	1.12	1.11	1.10	1.12	1.06	1.13
Fe	1.25	1.19	1.26	1.21	1.22	1.25	1.21	1.26	1.27	1.22	1.17
La	0.20	0.21	0.20	0.19	0.22	0.16	0.20	0.18	0.15	0.18	0.15
Ce	0.45	0.44	0.43	0.41	0.45	0.43	0.44	0.43	0.41	0.43	0.43
Pr	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.06	0.05	0.06	0.06	0.04	–
Nd	0.15	0.14	0.15	0.16	0.14	0.18	0.15	0.16	0.17	0.14	0.10
Sm	0.03	–	0.03	0.04	–	0.02	–	0.03	0.03	–	–
O	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5

Примечание. Здесь и далее прочерк – количество элемента меньше предела обнаружения.

Note. Here and below, a dash indicates the amount of the element is less than the detection limit.

Таблица 4. Химический состав неидентифицированных Ce–Fe-соединений из риолитов шатакского комплекса, мас. %**Table 4.** Chemical composition of unidentified Ce–Fe compounds from rhyolites of the Shatak Complex, wt %

Компонент	№ обр.			
	15ш-3-90	15ш-3-92	15ш-3-95	15ш-3-98
SiO ₂	2.29	1.77	11.02	8.19
TiO ₂	2.98	1.73	0.87	2.70
CaO	0.79	0.77	0.76	1.24
FeO	25.59	16.59	16.96	17.51
Al ₂ O ₃	3.20	1.72	1.50	4.01
Ce ₂ O ₃	45.79	54.94	48.17	45.14
P ₂ O ₅	5.88	6.10	6.07	5.37
Сумма	86.52	83.62	85.35	84.16

закрывающаяся в обогащении центральных частей церием, ниодимом и отчасти самарием. Возможно, как вариант своеобразной “зональности” можно интерпретировать ситуацию, изображен-

ную на рис. 3д, где призматический кристалл алланита обрастает по периферии и трещинам неидентифицированным Ce–Fe-соединением, химический состав которого (табл. 4) не позволяет от-

Таблица 5. Химический состав монацита из риолитов шатакского комплекса, мас. %

Table 5. Chemical composition of monazite from rhyolites of the Shatak complex, wt %

Компонент	№ обр.					
	15ш-3-99	15ш-3-105	15ш-3-111	15ш-3-116	15ш-3-117	15ш-7-96
SiO ₂	0.78	—	—	—	—	0.83
CaO	0.23	—	9.77	0.15	0.22	3.15
FeO	0.38	0.67	—	0.46	0.37	5.05
La ₂ O ₃	15.08	15.65	13.31	16.37	15.50	18.56
Ce ₂ O ₃	32.14	34.14	27.66	32.88	34.62	14.92
Pr ₂ O ₃	3.17	3.45	2.62	3.31	2.99	3.43
Nd ₂ O ₃	13.57	13.02	11.30	11.77	11.64	13.16
Sm ₂ O ₃	2.14	2.15	1.00	1.83	1.69	1.96
Gd ₂ O ₃	0.99	1.04	—	0.95	0.70	1.01
P ₂ O ₅	29.96	30.85	32.08	30.10	28.49	29.33
ThO ₂	—	—	—	—	—	5.00
Сумма	98.44	70.12	97.74	97.82	96.22	96.40
Кристаллохимические коэффициенты						
Si	0.03	—	—	—	—	0.03
Ca	0.01	—	0.36	0.01	0.01	0.13
Fe	0.01	0.02	—	0.02	0.01	0.16
La	0.22	0.22	0.17	0.24	0.23	0.26
Ce	0.46	0.48	0.35	0.48	0.52	0.20
Pr	0.05	0.05	0.03	0.05	0.04	0.05
Nd	0.19	0.18	0.14	0.17	0.17	0.18
Sm	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03
Gd	0.01	0.01	—	0.01	0.01	0.01
P	0.99	1.01	0.94	1.01	0.98	0.93
Th	—	—	—	—	—	0.04
O	4	4	4	4	4	4

нести его ни к одному из известных редкоземельных минералов.

Монацит-(Ce) распространен локально и встречается в очень небольших количествах. Он установлен в удлинённо-округлых и изометричных выделениях размером от первых микрон до 25 мкм (редко) и приурочен к кварцевым прожилкам и обособлениям (см. рис. 4д, е). В двух случаях монацит обнаружен включённым в зерна фторапатита (табл. 5, обр. 15ш-3-99, 15ш-3-111). По химическому составу большая часть монацитов относится к цериевой разновидности. Лишь в одном случае обнаружен монацит-(La) (табл. 5, обр. 15ш-7-96).

Ниобозинит-(Y) впервые установлен на Южном Урале. Ранее в Ильменах была установлена его цериевая разновидность (Кобяшев и др., 2000; Рассомахин, Касаткин, 2020). В породах шатакского комплекса ниобозинит-(Y) встречается в относительно крупных (до 100 мкм), как правило ксено-

морфных, выделениях (рис. 5). Химический состав минерала подвержен значительным колебаниям (табл. 6), что обусловлено его неоднородным строением. В частности, как видно из рис. 5, в крайних частях минерала концентрируются Th и Nb, при том что Ti и отчасти Y распределены равномерно по площади ниобозинита-(Y).

Эшинит-(Y) встречается в двух случаях, в сростании с алланитом-(Ce) в виде сростка кристаллов размером до 50 мкм (см. рис. 4б) и в сростании с ниобозинитом-(Y) в виде слабоограненного кристалла размером до 20 мкм (см. рис. 5б). Его химический состав, как и состав ниобозинита-(Y), подвержен значительным колебаниям (см. табл. 6), что обусловлено совершенным изоморфизмом между минералами, и в нашем случае их разделение до некоторой степени становится условным.

Таленит-(Dy) впервые обнаружен на Южном Урале (табл. 7). Минерал в виде изометричных,

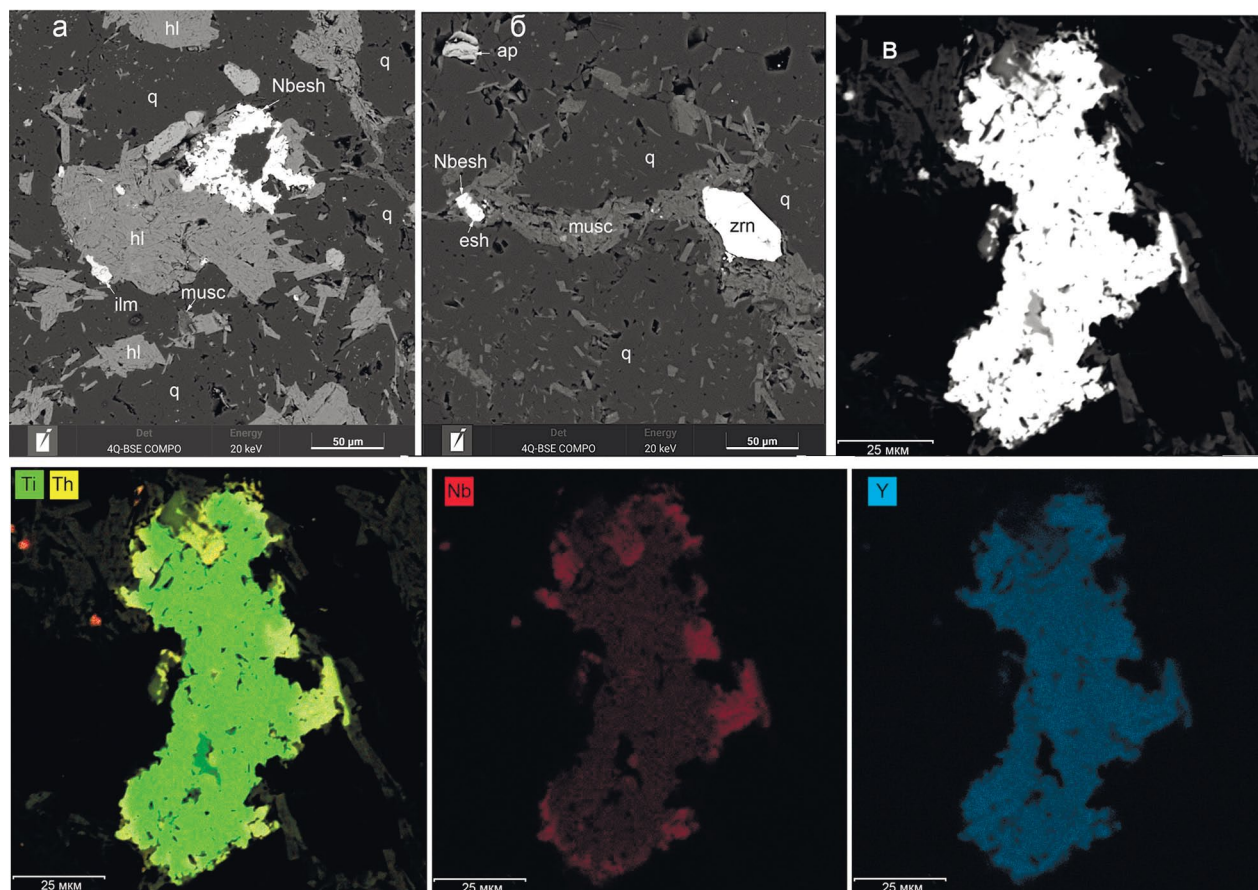


Рис. 5. Микрофотографии ниобезинита-(Y) (а–в) и съемка в характеристических лучах минерального агрегата, изображенного на микрофотографии “в”.

Nbesh – ниобезинит, *esh* – эшинит, *musc* – мусковит, *ilm* – ильменит, *ap* – апатит, *zrn* – циркон, *hl* – хлорит, *q* – кварц.

Fig. 5. Microphotographs of nioboeschinite-(Y) (a–v) and imaging in characteristic rays of the mineral aggregate depicted in microphotograph “v”.

Nbesh – nioboeschinite, *esh* – eschinite, *musc* – muscovite, *ilm* – ilmenite, *ap* – apatite, *zrn* – zircon, *hl* – chlorite, *q* – quartz.

слабоограниченных и ксеноморфных выделений установлен в тесном сростании с алланитом-(Ce) в ассоциации с хлоритом, титанитом, синхизитом и мусковитом (редко) (рис. 6), что особенно наглядно видно при съемке минералов в характеристических лучах (см. рис. 6).

Таленит-(Nd) впервые обнаружен на Южном Урале. Ранее близкий по составу минерал был описан на Приполярном Урале в пегматоидных стяжениях, обнаруженных в зоне Озерного разлома позднепалеозойского возраста (Козырева и др., 2004). В нашем случае таленит-(Nd) был обнаружен в ассоциации с алланитом-(Ce) и апатитом (см. рис. 6). Как видно из табл. 7, химический состав таленита-(Dy) и таленита-(Nd) различается в значительной степени. В частности, кроме различий в содержаниях Y_2O_3 и Dy_2O_3 в талените-(Nd) отсутствуют значимые содержания Er_2O_3 и Yb_2O_3 и

в больших количествах присутствуют РЗЭ легкой и средней групп.

Синхизит-(Ce) встречается довольно часто в описываемых породах в виде ксеноморфных агрегатов размером до 100–150 мкм, которые замещают кристаллы алланита (рис. 7а–в). При этом необходимо подчеркнуть, что в виде отдельных самостоятельных выделений синхизит не обнаружен. По химическому составу минерал относится к цериевой разновидности ($Ce > La + Pr + Nd + Sm + Gd$) с практически постоянным количеством фтора (табл. 8).

Минеральные агрегаты, изображенные на рис. 6, служат хорошей иллюстрацией локальной селективности РЗЭ при минералообразующих процессах: элементы легкой группы РЗЭ концентрируются в алланите-(Ce), а Y и тяжелой группы – в талените-(Dy), талените-(Nd) и фторапатите. При

Таблица 6. Репрезентативная выборка химического состава ниобозешенита-(Y) и эшенита-(Y) из риолитов шатакского комплекса, мас. %

Table 6. Representative sample of the chemical composition of nioboeshenit-(Y) and eschenite-(Y) from rhyolites of the Shatak complex, wt %

Компонент	№ п.п.										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	0.92	0.62	1.25	0.51	2.51	1.14	0.84	4.77	0.82	4.79	7.85
TiO ₂	43.10	47.98	45.84	47.21	39.12	32.46	32.46	32.89	26.34	32.13	30.36
FeO	1.02	—	0.81	0.68	3.01	0.57	—	4.18	2.34	15.16	9.54
Y ₂ O ₃	18.86	20.64	20.09	20.64	15.76	19.76	20.75	16.34	21.67	15.22	11.87
Nb ₂ O ₅	14.03	8.87	10.72	8.74	18.47	26.91	26.46	21.91	37.39	28.93	28.06
Nd ₂ O ₃	1.11	—	—	1.31	1.42	1.31	1.44	1.36	—	—	—
Sm ₂ O ₃	1.51	1.44	1.34	1.58	1.70	2.32	2.25	1.80	0.88	—	—
Gd ₂ O ₃	5.05	6.03	5.44	4.85	5.43	5.22	5.19	3.81	2.98	—	—
Dy ₂ O ₃	6.67	6.64	7.05	7.04	5.81	4.22	4.89	3.50	4.29	—	—
Ho ₂ O ₃	1.07	—	—	1.07	—	—	—	—	—	—	—
Er ₂ O ₃	2.40	2.50	2.37	2.48	1.80	1.74	1.75	1.40	2.01	—	—
Yb ₂ O ₃	—	—	—	0.69	—	0.88	0.75	—	1.36	—	—
Ta ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	2.00	—	—	2.05
ThO ₂	3.42	4.14	4.05	4.93	3.61	2.31	2.04	5.99	—	—	5.53
Сумма	99.16	98.86	98.96	101.73	98.64	98.84	98.82	99.95	100.08	96.23	95.26
Кристаллохимические коэффициенты											
Si	0.05	0.03	0.06	0.03	0.13	0.06	0.05	0.25	0.04	0.23	0.40
Ti	1.70	1.86	1.78	1.81	1.54	1.35	1.35	1.29	1.09	1.15	1.15
Fe	0.04	—	0.03	0.03	0.13	0.03	—	0.18	0.11	0.61	0.40
Y	0.53	0.57	0.55	0.56	0.44	0.58	0.61	0.45	0.63	0.39	0.32
Nb	0.33	0.21	0.25	0.20	0.44	0.67	0.66	0.52	0.93	0.62	0.64
Nd	0.02	—	—	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	—	—	—
Sm	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	—	—
Gd	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09	0.10	0.10	0.07	0.05	—	—
Dy	0.11	0.11	0.12	0.12	0.10	0.07	0.09	0.06	0.08	—	—
Ho	0.02	—	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—
Er	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	—	—
Yb	—	—	—	0.01	—	0.01	0.01	—	0.02	—	—
Ta	—	—	—	—	—	—	—	0.03	—	—	0.03
Th	0.04	0.05	0.05	0.06	0.04	0.03	0.03	0.07	—	—	0.06
O	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

этом необходимо подчеркнуть, что ксенотим, широко распространенный в различных структурно-вещественных комплексах западного склона Южного Урала (Ковалев, Ковалев, 2022), который является концентратором тяжелой группы РЗЭ в кислых разновидностях пород шатакского комплекса, не обнаружен.

Кроме собственных минералов редкоземельных элементов в породах комплекса был обнаружен оксид, состоящий из церия, лантана и железа. Се–La–Fe-оксид установлен в риодацитах сложенных

мелкозернистым серицит-хлорит-кварцевым агрегатом с порфировидными выделениями альбита на границе основной массы породы с кварцевым микропрожилком (рис. 8). Оксид представлен выделением шарообразной формы с диаметром около 13 мкм. В химическом составе преобладают церий, лантан и железо (табл. 9). Наличие остальных элементов, по нашему мнению, является результатом “загрязнения”, что обусловлено технической стороной анализа, а именно: малым размером объекта изучения при диаметре пучка электронов 3 мкм.

Таблица 7. Химический состав таленита из риолитов шатакского комплекса, мас. %**Table 7.** Chemical composition of talena from rhyolites of the Shatak complex, wt %

Компонент	№ п.п.					
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	30.14	30.81	32.72	31.11	31.03	31.44
CaO	2.84	2.62	3.96	3.99	4.16	3.80
FeO	5.09	3.98	4.02	4.13	4.47	4.19
Y ₂ O ₃	28.54	30.82	29.42	28.42	27.94	25.78
La ₂ O ₃	–	–	–	–	0.66	0.93
Ce ₂ O ₃	2.7	2.59	3.86	4.80	4.67	5.85
Pr ₂ O ₃	0.62	–	0.96	1.39	1.12	1.59
Nd ₂ O ₃	4.01	3.70	4.06	8.93	8.65	10.92
Sm ₂ O ₃	2.18	1.73	2.06	4.10	4.27	4.98
Gd ₂ O ₃	4.94	4.69	4.21	5.61	5.75	5.70
Tb ₂ O ₃	1.24	–	–	–	–	–
Dy ₂ O ₃	7.75	7.23	6.97	5.50	5.55	4.81
Ho ₂ O ₃	1.11	1.25	0.98	2.03	1.72	–
Er ₂ O ₃	2.03	2.63	2.02	–	–	–
Yb ₂ O ₃	0.86	1.14	1.07	–	–	–
Сумма	94.05	93.19	96.31	100.01	99.99	99.99
Кристаллохимические коэффициенты						
Si	1.96	2.00	2.02	1.91	1.90	1.94
Ca	0.20	0.18	0.26	0.26	0.27	0.25
Fe	0.28	0.22	0.21	0.21	0.23	0.22
Y	0.98	1.06	0.97	0.93	0.91	0.85
La	–	–	–	–	0.01	0.02
Ce	0.06	0.06	0.09	0.11	0.10	0.13
Pr	0.01	–	0.02	0.03	0.03	0.04
Nd	0.09	0.09	0.09	0.20	0.19	0.24
Sm	0.04	0.04	0.04	0.09	0.09	0.11
Gd	0.11	0.10	0.09	0.11	0.12	0.12
Tb	0.03	–	–	–	–	–
Dy	0.16	0.15	0.14	0.11	0.11	0.10
Ho	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	–
Er	0.04	0.05	0.04	–	–	–
Yb	0.02	0.02	0.02	–	–	–
O	7	7	7	7	7	7

Примечание. 1–3 – таленит-(Dy), 4–6 – таленит-(Nd).

Note. 1–3 – talena-(Dy), 4–6 – talena-(Nd).

Это выражается в увеличении количества магния, кремнезема, алюминия и отчасти кальция в краевых частях объекта исследования, что выступает результатом захвата матрицы при анализе. Съем-

ка объекта в характеристических лучах (см. рис. 8) показала его неоднородное строение, обусловленное в первую очередь неравномерным распределением железа.

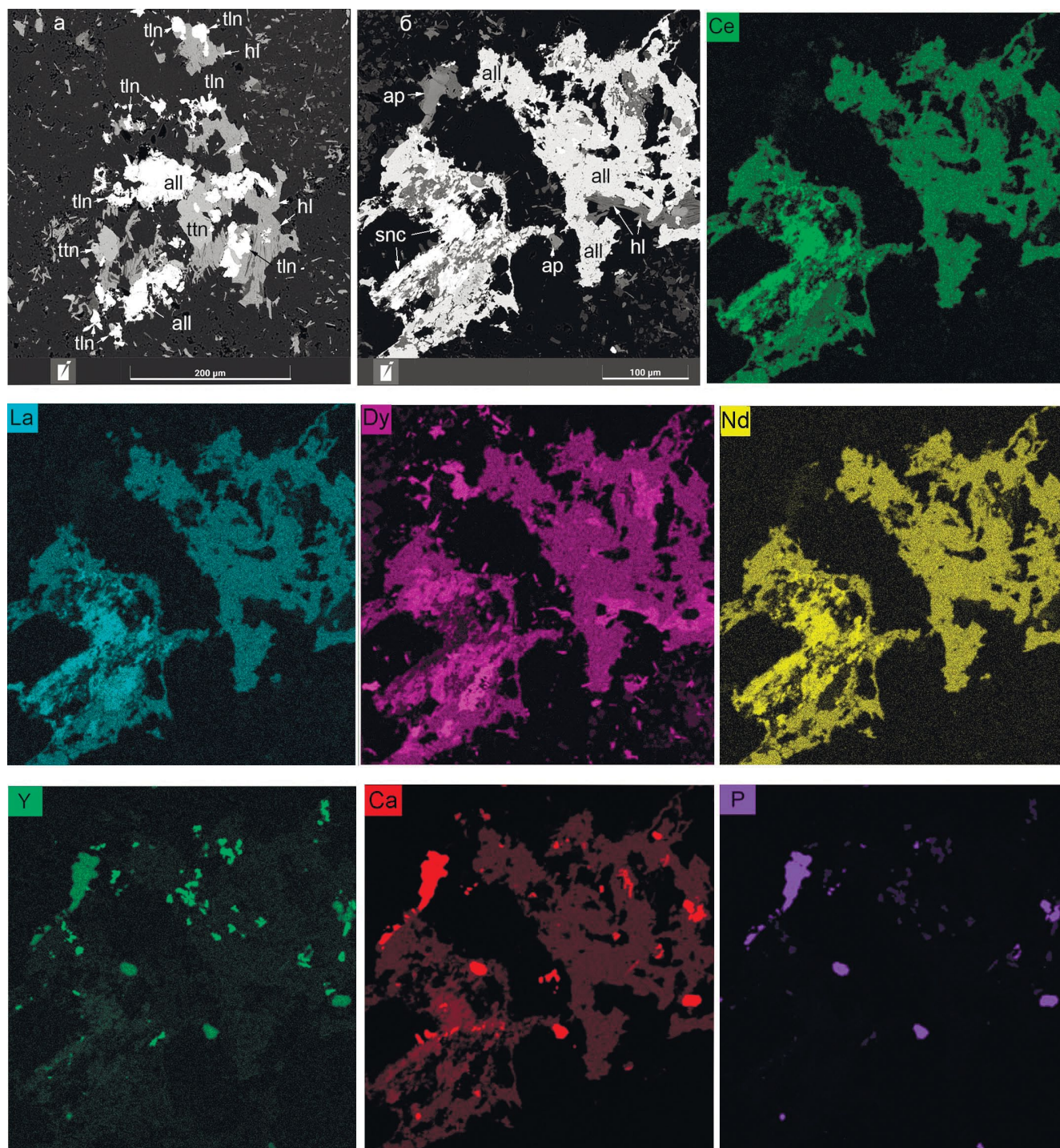


Рис. 6. Микрофотографии таленита-(Dy) (а, б) и съемка в характеристических лучах минерального агрегата, изображенного на микрофотографии “б”.

tln – таленит, *all* – алланит, *snc* – синхезит, *ttn* – титанит, *ap* – апатит, *hl* – хлорит.

Fig. 6. Microphotographs of talena-(Dy) (a, b) and shooting in characteristic rays of the mineral aggregate depicted in microphotograph “b”.

tln – talena, *all* – allanite, *snc* – synchesite, *ttn* – titanite, *ap* – apatite, *hl* – chlorite.

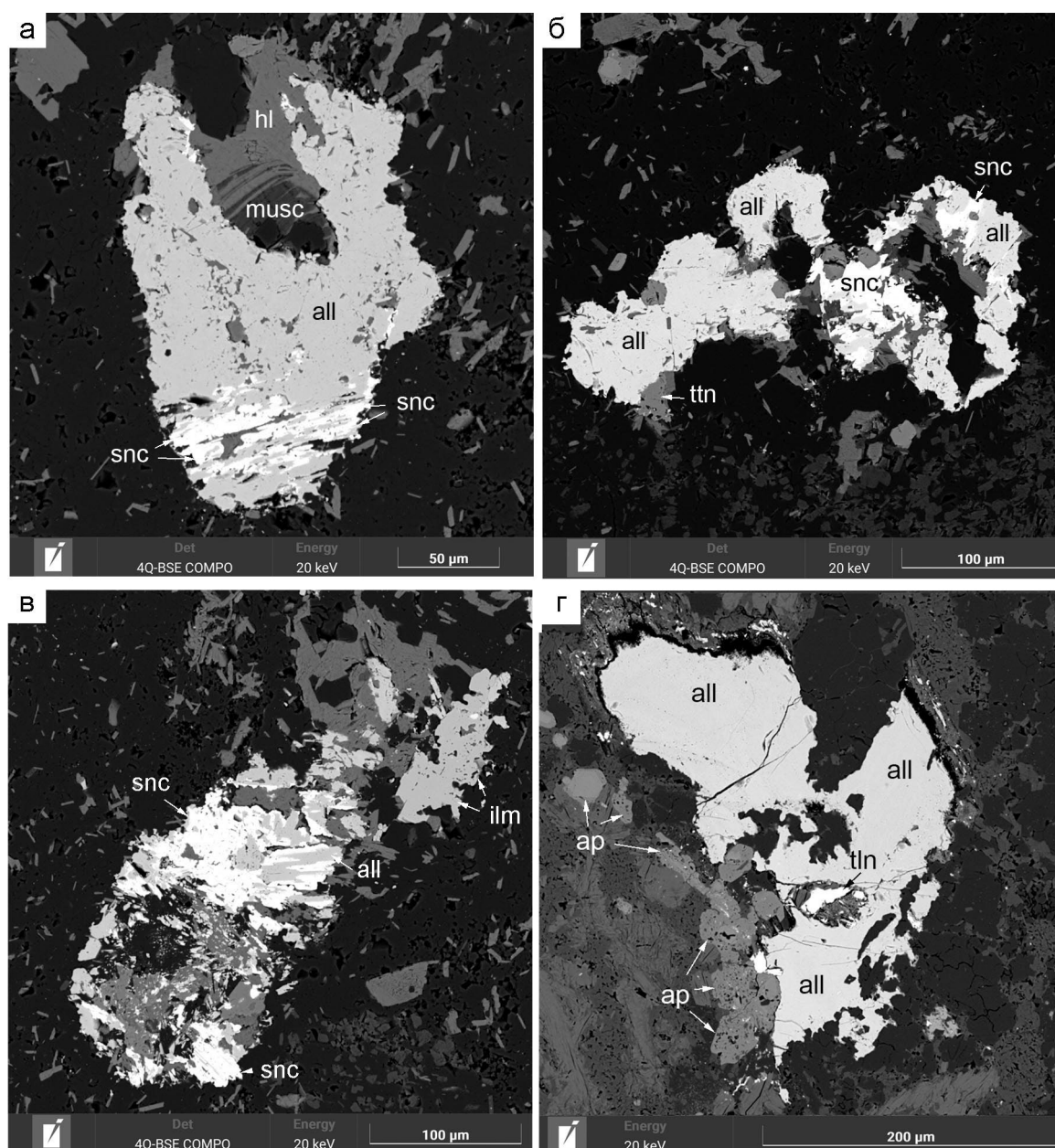


Рис. 7. Микрофотографии синхизита-(Ce) (а–в) и таленита-(Nd) (г) из кислых разновидностей пород щатакского комплекса.

snc – синхезит, *all* – алланит, *tln* – таленит, *ap* – апатит, *musc* – мусковит, *ilm* – ильменит, *ttn* – титанит, *hl* – хлорит.

Fig. 7. Micrographs of synhisite-(Ce) (a–в) and talena-(Nd) (г) from felsic rocks of the Shatak complex.

snc – synhesite, *all* – allanite, *tln* – talena, *ap* – apatite, *musc* – muscovite, *ilm* – ilmenite, *ttn* – titanite, *hl* – chlorite.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения показано, что кислые разновидности пород щатакского комплекса разнообразны по химическому составу, изменяясь от щелочных разновидностей (трахидациты) до низкощелочных риолитов. По петрохимическим ха-

рактеристикам они относятся к высокоглиноземистому типу, обладая калиевой специализацией и низким коэффициентом апаитности. Количество редкоземельных элементов подвержено существенным колебаниям, а их распределение характеризуется значительной дифференцированностью. В целом породы принадлежат к контрастной

Таблица 8. Химический состав синхизита-(Ce) из риодацитов шатакского комплекса, мас. %

Table 8. Chemical composition of synhisite-(Ce) from rhyodacites of the Shatak complex, wt %

Компонент	№ точки					
	130-87	130-88	130-89	130-109	130-110	130-143
CO ₂	21.98	21.98	21.98	21.98	21.98	20.15
Al ₂ O ₃	0.95	0.46	0.26	0.47	0.30	2.68
CaO	17.60	17.28	13.24	18.27	18.41	17.61
FeO	1.18	0.63	0.92	0.51	0.49	2.41
Y ₂ O ₃	0.85	1.07	0.70	1.59	1.10	1.11
La ₂ O ₃	12.22	11.86	14.13	13.39	14.52	11.00
Ce ₂ O ₃	23.32	23.61	26.35	24.18	23.65	22.20
Pr ₂ O ₃	2.62	2.87	2.86	2.53	2.75	2.71
Nd ₂ O ₃	9.92	10.50	9.91	9.02	9.11	9.86
Sm ₂ O ₃	1.86	2.28	1.86	1.23	1.46	2.05
Gd ₂ O ₃	1.08	1.34	1.10	0.88	0.92	1.22
Сумма	93.58	93.88	93.31	94.05	94.69	93.0
F	5.17	5.20	7.50	5.52	5.80	5.05
Кристаллохимические коэффициенты						
C	3.00	3.03	3.05	3.00	2.99	2.75
Al	0.11	0.05	0.03	0.06	0.04	0.31
Ca	1.89	1.87	1.56	1.96	1.97	1.89
Fe	0.10	0.05	0.08	0.04	0.04	0.20
Y	0.05	0.06	0.04	0.08	0.06	0.06
La	0.45	0.44	0.57	0.49	0.53	0.41
Ce	0.85	0.87	1.05	0.88	0.86	0.81
Pr	0.10	0.11	0.11	0.09	0.10	0.10
Nd	0.35	0.38	0.39	0.32	0.32	0.35
Sm	0.06	0.08	0.07	0.04	0.05	0.07
Gd	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04
O	11	11	11	11	11	11

базальт-риолитовой серии, а их генезис обусловлен дифференциацией магмы в промежуточном очаге. При этом мы предполагаем, что в целом кислые разновидности являются субвулканическими образованиями и термин “риолиты” в данном случае характеризует химический состав пород, но не генезис.

При детальном изучении минералогии пород шатакского комплекса впервые обнаружены многочисленные редкоземельные минералы: алланит-(Ce), монацит-(Ce), монацит-(La), ниобозинит-(Y), эшинит-(Y), таленит-(Dy), таленит-(Nd), синхизит-(Ce) и неидентифицированные соединения: Ce–La–Fe-оксид и соединение Ce–Fe. Наличие парагенетических ассоциаций редкоземельных минералов – алланита-(Ce) + эшинита-(Y) + ниобозинита-(Y) и алланита-(Ce) + таленита-(Dy) + таленита-(Nd) – свидетельству-

ет о формировании редкоземельной минерализации в кислых разновидностях пород шатакского комплекса в ходе единого процесса. Генезис минерализации в настоящее время может быть описан лишь схематически. Его особенностью является наличие Ce–La–Fe-оксида, который обособляется из расплава по ликвационному механизму. Анализ бинарных диаграмм состояния систем Ce–La, Ce–Fe и La–Fe свидетельствует, что температура образования трехкомпонентного расплава Ce–La–Fe превышает 1000°C (Гшнейднер, 1965; Диаграммы..., 1996, 1997). Процесс ликвации расплава, содержащего редкоземельные элементы, хорошо изучен экспериментально (Сук, 2017; Шаповалов и др., 2019; Делицын, 2019), что делает наши предположения в достаточной степени обоснованными. Основной этап редкоземельного минералообразования, вероятнее всего, связан с дина-

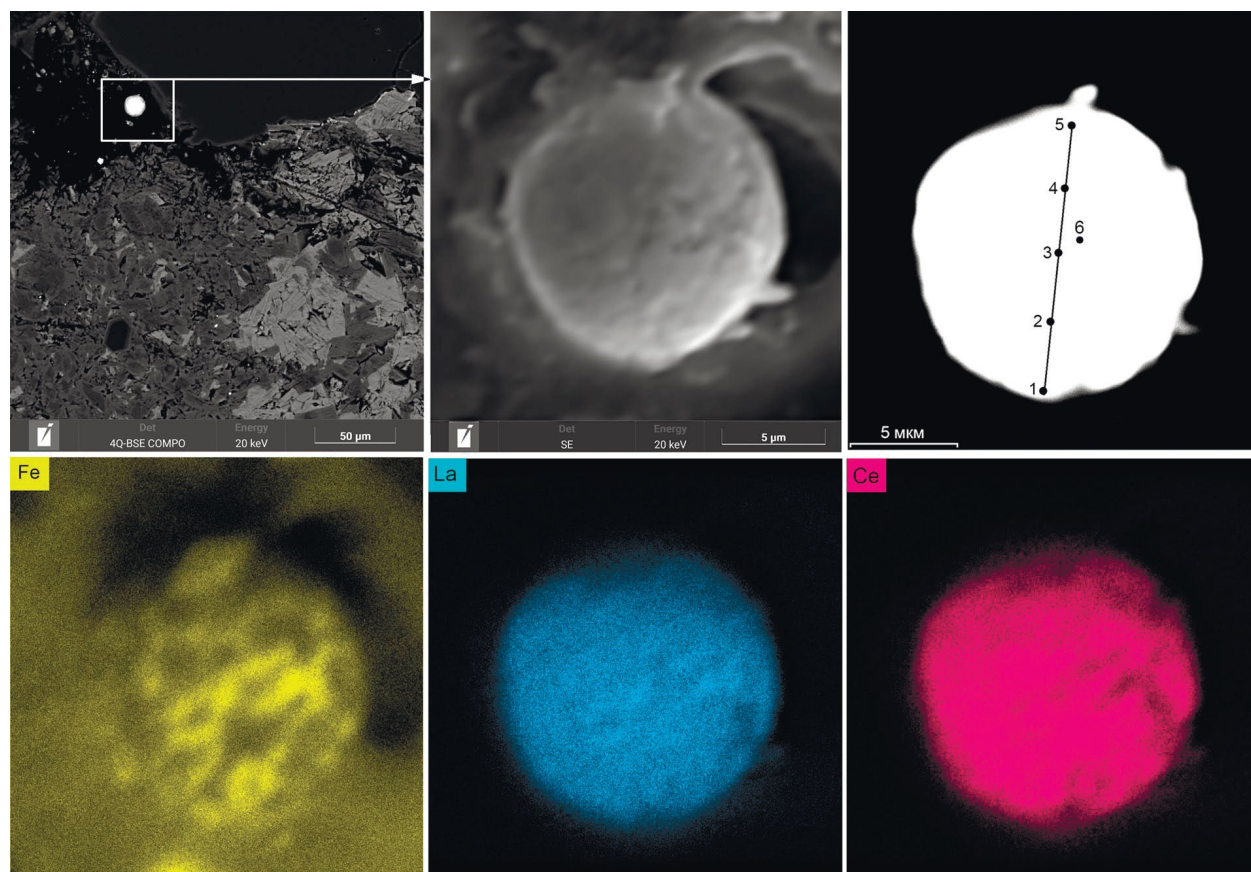


Рис. 8. Микрофотографии и результаты съемки в характеристических лучах Ce–La–Fe-оксида из риодацитов шатакского комплекса.

Номера точек на профиле соответствуют номерам анализов из табл. 9.

Fig. 8. Microphotographs and results of characterization of the Ce–La–Fe-oxide compound from rhyodacites of the Shatak Complex.

The number of points on the profile correspond to the numbers of analyzes from Table 9.

Таблица 9. Химический состав Ce–La–Fe оксида из риодацитов шатакского комплекса, мас. %

Table 9. Chemical composition of Ce–La–Fe oxide compound from rhyodacites of the Shatak complex, wt %

Компонент	№ точки					
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	12.18	2.69	1.74	3.75	13.24	1.83
Al ₂ O ₃	6.78	1.18	1.33	0.74	2.71	0.55
La ₂ O ₃	26.26	34.69	38.89	36.17	29.09	36.35
Ce ₂ O ₃	38.00	51.15	46.94	54.27	48.28	55.21
FeO	10.37	7.64	11.55	3.57	3.76	6.20
MgO	2.95	–	–	–	1.37	–
CaO	2.02	0.14	–	0.89	0.66	–
K ₂ O	0.49	0.16	–	0.09	0.24	–
Сумма	99.05	97.65	100.45	99.48	99.35	100.14

мотермальным метаморфизмом пород шатакского комплекса в вендское время. Ранее было показано, что его P - T -параметры, определенные по химическому составу светлых слюд из терригенных отложений, были следующими: максимальные – $T \approx 470^\circ\text{C}$, $P \approx 8$ кбар, минимальные – $T \approx 380^\circ\text{C}$, $P \approx 3$ кбар (Ковалев и др., 2018б). Рассчитанные температуры образования хлорита (по 46 химическим составам минерала) из кислых разновидностей (Kranidiotis et al., 1987) располагаются в узком диапазоне $287\text{--}354^\circ\text{C}$, что свидетельствует о проявлении метаморфизма во всех петротипах пород, входящих в состав шатакского комплекса, и, как следствие, делает наше предположение реальным. Описанный тип минерализации не имеет аналогов на западном склоне Южного Урала, и его исследование должно быть продолжено.

Благодарности

Авторы благодарны рецензентам за детальное рассмотрение работы и плодотворную дискуссию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Тимофеева Е.А. (2003) Монацитовая минерализация и перспективы редкоземельного оруденения в рифейских отложениях Башкирского мегантиклинория. *Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Башкортостана*. (Отв. ред. В.Н. Пучков, Д.Н. Салихов). Т. 2. Уфа: б. и., 112-115.
- Алексеев А.А., Тимофеева Е.А. (2007) Редкоземельно-фосфатная минерализация в метатерригенных толщах рифея Башкирского мегантиклинория. *Геол. сборник*, (3), 194-195.
- Булах А.Г. (1967) Руководство и таблицы для расчета формул минералов. М.: Недра, 141 с.
- Гшнейднер К.А. (1965) Сплавы редкоземельных металлов. М.: Мир, 427 с.
- Делицын Л.М. (2019) Распределение TR_2O_3 , P_2O_5 и Nb_2O_5 между двумя несмешивающимися расплавами в системе монацит– SiO_2 – NaF – Nb_2O_5 – Fe_2O_3 . *Докл. АН*, **489**(6), 599-605.
- Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. Т. 1. (1996) (Под общ. ред. Н.П. Лякишева). М.: Машиностроение, 992 с.
- Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. Т. 2. (1997) (Под общ. ред. Н.П. Лякишева). М.: Машиностроение, 1024 с.
- Козырева И.В., Швецова И.В., Попова Т.Н. (2004) Находка Nd-таленита на Приполярном Урале. *Вестн. Коми НЦ*, (6), 2-3.
- Кобяшев Ю.С., Никандров С.Н., Вализер П.М. (2000) Минералы Ильменских гор. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 119 с.
- Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. (2006) Новый тип благороднометальной минерализации в терригенных породах Шатакского грабена (западный склон Южного Урала). *Литология и полез. ископаемые*, (4), 415-421.
- Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. (2008) Новые данные по геологии Шатакского комплекса (западный склон Южного Урала). *Литология и полез. ископаемые*, (3), 280-289.
- Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Высоцкий С.И. (2017) Th–REE минерализация в докембрийских породах Башкирского мегантиклинория: видовое разнообразие и генезис. *Зап. РМО*, (5), 59-79.
- Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. (2018а) Модель образования магматических пород Шатакского комплекса. *Геол. вестн.*, (2), 3-13. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-2-1>
- Ковалев С.С., Пучков В.Н., Ковалев С.Г., Высоцкий С.И. (2018б) Первые данные о количественной оценке параметров вендского метаморфизма восточной части Башкирского мегантиклинория. *Докл. АН*, **483**(3), 301-305.
- Ковалев С.Г., Ковалев С.С. (2022) Ксенотимовая минерализация в различных структурно-вещественных комплексах Башкирского мегантиклинория (Южный Урал). *Зап. РМО*, **151**(1), 74-91. <https://doi.org/10.31857/S0869605522010075>
- Кривовичев В.Г., Гульбин Ю.Л. (2022) Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов. *Зап. РМО*, **151**(1), 114-124. <https://doi.org/10.31857/S0869605522010087>
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Ронкин Ю.Л., Гареев Э.З., Лепихина О.П., Попова О.Ю. (2004) Тонкозернистые алюмосиликокластические образования стратотипического разреза среднего рифея на Южном Урале: особенности формирования, состав и эволюция источников сноса. *Литология и полез. ископаемые*, (4), 414-441.
- Маслов А.В., Гареев Э.З., Подковыров В.Н., Ковалев С.Г., Котова Л.Н. (2018) Синрифтовые осадочные образования машакской свиты среднего рифея Южного Урала (краткая литохимическая характеристика). *Вестн. СПбГУ. Науки о Земле*, **63**(3), 303-325.
- Парначев В.П., Ротарь А.Ф., Ротарь З.М. (1986) Среднерифейская вулканогенно-осадочная ассоциация Башкирского мегантиклинория (Южный Урал). Свердловск: УНЦ АН СССР, 105 с.
- Пучков В.Н. (2000) Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 146 с.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Рассомахин М.А., Касаткин А.В. (2020) Дополнения к кадастру минералов Ильменских гор. *Минералогия*, **6**(2), 18-26. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-2-2>
- Сук Н.И. (2017) Жидкостная несмешимость в щелочных магматических системах. М.: Университетская книга, 238 с.
- Шаповалов Ю.Б., Котельников А.Р., Сук Н.И., Коржинская В.С., Котельникова З.А. (2019) Жидкостная несмешимость и проблемы рудогенеза (по экспериментальным данным). *Петрология*, **27**(5), 577-597. <https://doi.org/10.31857/S0869-5903275577-597>
- Hoog J.C.M. de, Gall L., D.H. Cornell (2010) Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry. *Chem. Geol.*, **270**(1-4), 196-215. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeol.2010.01.016>

- chemgeo.2009.11.017
- Paolo D.J. de (1981) Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **53**(2), 189-202. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(81\)90153-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(81)90153-9)
- Ernst R.E. (2014) Large Igneous Provinces. Cambridge: Cambridge University Press, 653 p.
- Kranidiotis P., MacLean W.H. (1987) Systematic of Chlorite Alteration at the Phelps Dodge Massive Sulfide Deposit, Matagami, Quebec. *Econ. Geol.*, **82**(7), 1808-1911. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.7.1898>
- Loucks R.R. (1996) A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **125**, 140-150.
- McDonough W.F., Sun S.S. (1995) Composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**(3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)28940-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)28940-4)
- Puchkov V.N., Bogdanova S.V., Ernst R., Kozlov V., Krasnobayev A.A., Soderlund U., Wingate M.T.D., Postnikov A.V., Sergeeva N.D. (2013) The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals. *Lithos*, **174**, 109-124.
- ### REFERENCES
- Alekseev A.A., Alekseeva G.V., Timofeeva E.A. (2003) Monazite mineralization and prospects for rare earth mineralization in the Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium. *Geology, minerals and problems of ecology of Bashkortostan*. (Ed. by V.N. Puchkov, D.N. Salikhov). V. 2. Ufa, 112-115. (In Russ.)
- Alekseev A.A., Timofeeva E.A. (2007) Rare earth-phosphate mineralization in metaterrigenous strata of the Riphean Bashkir meganticlinorium. *Geol. sbornik*, (3), 194-195. (In Russ.)
- Bulakh A.G. (1967) Guidelines and tables for calculating mineral formulas. Moscow, Nedra Publ., 141 p. (In Russ.)
- Gshneidner K.A. (1965) Alloys of rare earth metals. Moscow, Mir Publ., 427 p. (In Russ.)
- Hoog J.C.M. de, Gall L., D.H. Cornell (2010) Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry. *Chem. Geol.*, **270**(1-4), 196-215. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.11.017>
- Paolo D.J. de (1981) Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **53**(2), 189-202. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(81\)90153-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(81)90153-9)
- Delitsyn L.M. (2019) Distribution of TR_2O_3 , P_2O_5 and Nb_2O_5 between two immiscible melts in the monazite– SiO_2 – NaF – Nb_2O_5 – Fe_2O_3 system. *Dokl. AN*, **489**(6), 599-605. (In Russ.)
- Diagrams of the state of binary metal systems: Handbook. V. 1. (1996) (Ed. by N.P. Lyakishev). Moscow, Mashinostroenie, 992 p. (In Russ.)
- Diagrams of the state of binary metallic systems: Handbook. V. 2. (1997) (Ed. by N.P. Lyakishev). Moscow, Mashinostroenie, 1024 p. (In Russ.)
- Ernst R.E. (2014) Large Igneous Provinces. Cambridge, Cambridge University Press, 653 p.
- Kobayashv Yu.S., Nikandrov S.N., Valizer P.M. (2000) Minerals of the Ilmensky mountains. Miass, IGZ UB RAN, 119 p. (In Russ.)
- Kovalev S.G., Vysotskii I.V. (2006) A new type of noble metal mineralization in terrigenous rocks of the Shatak graben (western slope of the Southern Urals). *Litologiya i Polez. Iskopaemye*, (4), 415-421. (In Russ.)
- Kovalev S.G., Vysotskii I.V. (2008) New data on the geology of the Shatak complex (western slope of the Southern Urals). *Litologiya i Polez. Iskopaemye*, (3), 280-289. (In Russ.)
- Kovalev S.G., Kovalev S.S., Vysotsky S.I. (2017) Th-REE mineralization in Precambrian rocks of the Bashkir meganticlinorium: species diversity and genesis. *Zap. RMO*, (5), 59-79. (In Russ.)
- Kovalev S.G., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. (2018a) Model of formation of igneous rocks of the Shatak complex. *Geol. vestn.*, (2), 3-13. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-2-1>. (In Russ.)
- Kovalev S.S., Puchkov V.N., Kovalev S.G., Vysotsky S.I. (2018b) First data on the quantitative assessment of the Vendian metamorphism parameters of the eastern part of the Bashkir meganticlinorium. *Dokl. AN*, **483**(3), 301-305. (In Russ.)
- Kovalev S.G., Kovalev S.S. (2022) Xenotime mineralization in various structural and material complexes of the Bashkir meganticlinorium (Southern Urals). *Zap. RMO*, **151**(1), 74-91. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869605522010075>
- Kozyreva I.V., Shvetsova I.V., Popova T.N. (2004) Finding of Nd-talena in the Subpolar Urals. *Vestn. Komi NTs*, (6), 2-3. (In Russ.)
- Kranidiotis P., MacLean W.H. (1987) Systematic of Chlorite Alteration at the Phelps Dodge Massive Sulfide Deposit, Matagami, Quebec. *Econ. Geol.*, **82**(7), 1808-1911. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.7.1898>
- Krivovichev V.G., Gul'bin Yu.L. (2022) Recommendations for the calculation and presentation of formulas of minerals according to chemical analyzes. *Zap. RMO*, **151**(1), 114-124. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869605522010087>
- Loucks R.R. (1996) A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **125**, 140-150.
- Maslov A.V., Krupenin M.T., Ronkin Yu.L., Gareev E.Z., Lepikhina O.P., Popova O.Yu. (2004) Fine-grained aluminosiliciclastic formations of the stratotype section of the Middle Riphean in the Southern Urals: features of formation, composition and evolution of provenance sources. *Litologiya i Polez. Iskopaemye*, (4), 414-441. (In Russ.)
- Maslov A.V., Gareev E.Z., Podkovyrov V.N., Kovalev S.G., Kotova L.N. (2018) Synrift sedimentary formations of the Mashak Formation of the Middle Riphean of the Southern Urals (brief lithochemical characteristics). *Vestn. SPBGU. Nauki o Zemle*, **63**(3), 303-325. (In Russ.)
- McDonough W.F., Sun S.S. (1995) Composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**(3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)28940-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)28940-4)
- Parnachev V.P., Rotar' A.F., Rotar' Z.M. (1986) Middle Riphean volcanogenic-sedimentary association of the Bashkir meganticlinorium (Southern Urals). Sverdlovsk, UNTs AN USSR, 105 p. (In Russ.)
- Puchkov V.N. (2000) Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals. Ufa, Dauria Publ., 146 p. (In Russ.)
- Puchkov V.N. (2010) Geology of the Urals and Cis-Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, DesignPolygraphService, 280 p.

- (In Russ.)
- Puchkov V.N., Bogdanova S.V., Ernst R., Kozlov V., Krasnobayev A.A., Soderlund U., Wingate M.T.D., Postnikov A.V., Sergeeva N.D. (2013) The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals. *Lithos*, **174**, 109-124.
- Rassomakhin M.A., Kasatkin A.V. (2020) Additions to the cadastre of minerals of the Ilmensky mountains. *Mineralogiya*, **6**(2), 18-26. (In Russ.) <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-2-2>
- Shapovalov Yu.B., Kotel'nikov A.R., Suk N.I., Korzhinskaya V.S., Kotel'nikova Z.A. (2019) Liquid immiscibility and problems of ore formation (according to experimental data). *Petrology*, **27**(5), 577-597. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-5903275577-597>
- Suk N.I. (2017) Liquid immiscibility in alkaline magmatic systems. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 238 p. (In Russ.)