

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД ШАТАКСКОГО КОМПЛЕКСА

© 2018 г. С. Г. Ковалев, С. И. Высоцкий, С. С. Ковалев

Реферат. На основе материалов по детальной минералогии и изотопно-геохимическим характеристикам магматических пород Шатакского комплекса разработана детальная модель его формирования. Показано, что генезис всего разнообразия магматических пород комплекса (пикритов, базальтов, риолитов) удовлетворяет условиям AFC (Assimilation Fractional Crystallization) процесса, заключающегося в фракционировании ликвидусных фаз (оливин ± клинопироксен) и накоплении флюидной фазы в прикровельной части камеры/очага, с одной стороны, и ассимиляции вмещающих пород — с другой.

Ключевые слова: Шатакский комплекс, Rb-Sr изотопная система, Sm-Nd изотопная система, пикриты, базальты, риолиты, AFC-процесс, фракционирование, ассимиляция

MODEL OF ORIGIN OF MAGMATIC ROCKS OF THE SHATAK COMPLEX

S. G. Kovalev, S. I. Vysotsky, S. S. Kovalev

Abstract. Based on materials on detailed mineralogy and isotope-geochemical characteristics of igneous rocks of the Shatak Complex, a detailed model of its formation is given. It is shown that the origin of the diversity of igneous rocks (picrites, basalt, rhyolite) satisfies the conditions of AFC (Assimilation Fractional Crystallization) process that occurs as a fractionation of liquidus phases (olivine ± clinopyroxene) and an accumulation of a fluid phase in the upper part of the chamber on one side and assimilation host rocks on the other.

Keywords: Shatak complex, Rb-Sr isotope system, Sm-Nd isotope system, picrites, basalts, rhyolites, the AFC-process, fractionation, assimilation

Представление о том, что формирование крупных магматических провинций (LIPs) связано с плюмами/суперплюмами, распространено в настоящее время достаточно широко и подтверждается многочисленными фактами и наблюдениями [Добрецов и др., 2010; Puchkov et al., 2013; Пучков, Ковалев, 2013; Ernst, 2014]. Вместе с тем проблема разнообразия формационно-генетических типов магматических пород, формирующихся в верхних горизонтах континентальной коры, остается не до конца решенной.

В рифейской истории западного склона Южного Урала среднерифейский этап является временем с максимальным развитием магматизма на

обширной территории (рис. 1) преимущественно в интрузивной форме с повышенной основностью пород (пикриты, пикродолериты, дайки меланократовых габбро-долеритов). Более того, как установлено в последнее время, «машакское магматическое событие» в виде вулканитов, дайковых роев и глубинных интрузий распространилось далеко за пределы Башкирского мегантиклинория (Восточно-Европейская платформа, Тиман, Гренландия, Сибирский кратон) и представляет собой явление субглобального масштаба плюмовой/суперплюмовой природы [Пучков, Ковалев, 2013].

Шатакский комплекс представляет собой стратифицированную вулканогенно-осадочную

Для цитирования: Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. Модель образования магматических пород Шатакского комплекса // Геологический вестник. 2018. №2. С. 3–13. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-2-1>.

For citation: Kovalev S.G., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Model of origin of magmatic rocks of the Shatak Complex // Geologicheskii vestnik. 2018. No.2. P. 3–13. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-2-1>.

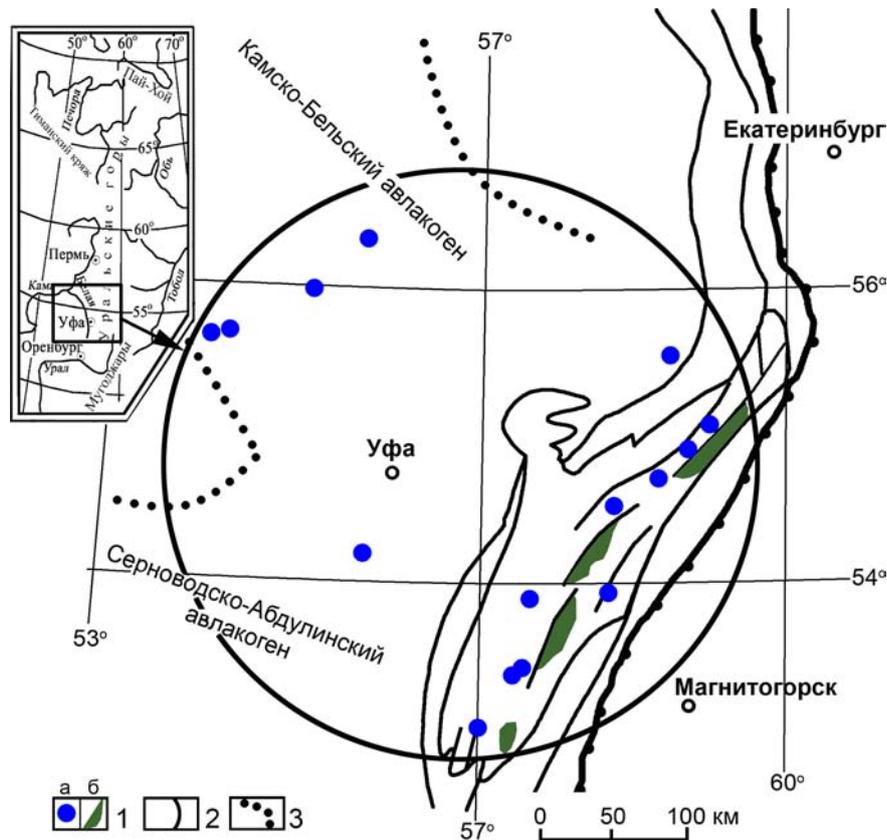


Рис. 1. Схема распространения магматических пород среднерифейского возраста в пределах западного склона Южного Урала и прилегающей части Восточно-Европейской платформы. По [Ковалев и др., 2017]

Условные обозначения: 1 — магматические породы (а — интрузивные, б — эффузивные); 2 — условные границы области распространения среднерифейского магматизма; 3 — границы авлакогенов.

Fig. 1. Scheme of development of magmatic environments of the Middle Riphean age within the western slope of the Southern Urals and the adjacent part of the East European platform. By [Kovalev et al., 2017]

Legend: 1 — igneous rocks (a — intrusive, б — effusive); 2 — conditional boundaries of the area of distribution of Middle Riphean magmatism; 3 — boundaries of aulacogenes.

ассоциацию, залегающую в основании средне-рифейского разреза Башкирского мегантиклинория (рис. 2) и совместно с Машакским, Кувашским и Кусинско-Копанским комплексами является индикаторным для характеристики геодинамического развития территории Южного Урала в среднем рифее. Осадочные породы Шатакского комплекса

слагают около 75% его объема и представлены преимущественно грубозернистыми разностями: конгломератами и песчаниками. Алевролиты, алевросланцы и сланцы встречаются относительно редко. Конгломераты развиты на нескольких стратиграфических уровнях. Они на 70–80% сложены хорошо окатанными обломками кварцито-песчаников

Условные обозначения к рис. 2: PZ — нерасчлененные отложения палеозоя; 1 — венд; 2 — завершающий рифей (аршиний); 3 — верхний рифей; 4 — нижний и средний рифей Маярдакского антиклинория; 5 — нерасчлененные отложения зигазино-комаровской и авзынской свит; 6 — зигалгинская свита (RF₂); 7 — машакская свита (RF₂); 8 — бакальская и юшинская свиты; 9 — саткинская и суранская свиты; 10 — айская и большеинзерская свиты; 11 — метаморфические образования архея — раннего протерозоя тараташского комплекса; 12 — метаморфические образования Уфалей-Уралтауского мегантиклинория; 13 — габбро-долериты (а), граниты (б); 14 — геологические границы; 15 — основные разрывные нарушения.

Legend to fig. 2: PZ — undivided Paleozoic deposits; 1 — Vendian; 2 — the final Riphean (arshiniy); 3 — upper Riphean; 4 — Lower and Middle Riphean of the Maardak anticlinorium; 5 — undivided sediments of the Zigazin-Komarovo and Avzyan Formations; 6 — the Zigalga Formations (RF₂); 7 — Mashak Formations (RF₂); 8 — the Bakal and Yushin Formations; 9 — Satka and Suran Formations; 10 — the Ai and Bolsheinzher Formations; 11 — metamorphic formations of the Archean–Early Proterozoic of the Taratash complex; 12 — metamorphic formations of the Ufaley-Uraltau megantiklinorium; 13 — gabbro-dolerites (a), granites (б); 14 — geological boundaries; 15 — the main thrusts and normal faults.

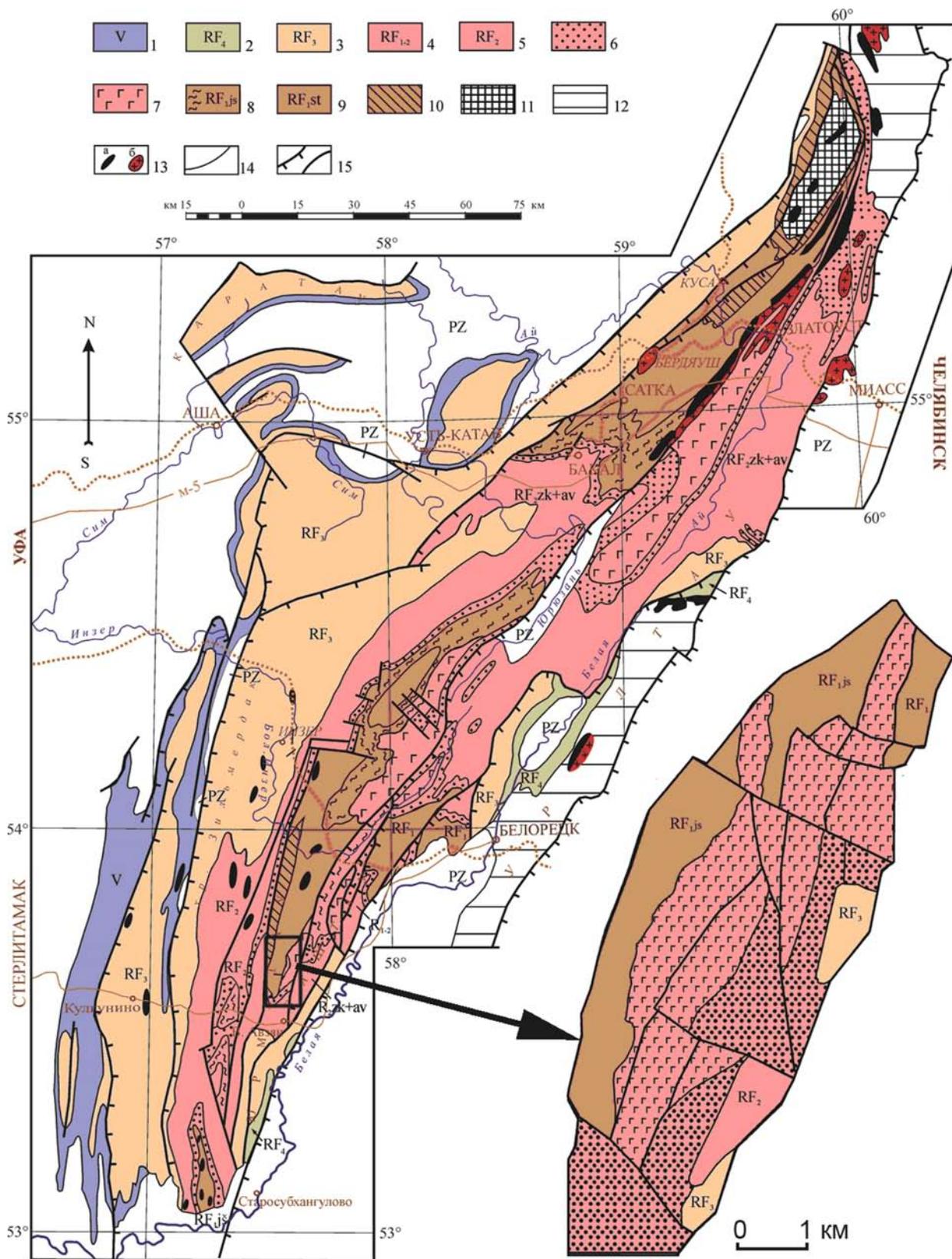


Рис. 2. Геологическая схема Башкирского мегантиклинория и Шатакского комплекса

Fig. 2. Geological scheme of the Bashkirian meganticlinorium and the Shatak complex

и кварцитов, реже железистых кварцито-песчаников и микрокварцитов. Цемент представлен кварцевым песчаным материалом и мелкочешуйчатой серицит-хлоритовой массой. Песчаники представлены кварцевыми разностями, на 80–90% состоящими из обломков кварца с хлорит-серицитовым цементом. Алевролиты, алевросланцы и сланцы встречаются в тонком переслаивании друг с другом, реже слагают самостоятельные маломощные горизонты и пачки.

Магматические породы Шатакского комплекса представлены пикритами, базальтами и риолитами. Пикриты образуют пластовую интрузию видимой мощностью около 25–30 м, расположенную в основании машакской свиты на ее непосредственной границе с подстилающими отложениями юшинской свиты (RF₁). Тело имеет дифференцированное строение, подразделяясь на три зоны: нижнюю эндоконтактовую, центральную и верхнюю эндоконтактовую. Породы верхней эндоконтактовой зоны представлены метадолеритами с микроофитовой и микродолеритовой структурой. Центральная часть интрузии сложена пикритами, первичными минералами которых являлись оливин, клинопироксен, ортопироксен и роговая обманка. Породы сильно изменены и практически полностью превращены в тальк-амфибол-серпентиновый агрегат. Нижний горизонт представлен интенсивно измененными пикродолеритами. Из первичных минералов по псевдоморфозам устанавливаются клинопироксен и плагиоклаз. Вторичные минералы представлены амфиболом, лейкоксеном, хлоритом, серпентином, альбитом, карбонатом, апатитом, тальком и серицитом.

Метабазальты, максимальное количество которых входит в состав кузьелгинской, казавдинской и каранской подсвит, представляют собой зеленые, зеленовато-серые, средне-мелкозернистые породы, для которых характерны микродолеритовая, микроофитовая, апоинтерсертальная и порфиroidная структуры. Минеральный состав пород включает в себя клинопироксен, плагиоклаз, роговую обманку, титаномагнетит и магнетит. Ассоциация вторичных минералов представлена амфиболом актинолит-тремолитового ряда, хлоритом (пеннин-клинохлор), эпидотом, серицитом, титанитом, лейкоксеном и гематитом. Часто в прикровельных и приподожвенных частях магматических тел наблюдаются обильные миндалины, выполненные кальцит-кварц-эпидот-хлоритовым агрегатом, что свидетельствует о значительной флюидонасыщенности внедрявшейся магмы.

Риолиты — светло-серые породы с порфиroidной флюидальной и шпирово-такситовой структурой. Основная масса сложена мелкозернистым кварц-полевошпатовым агрегатом. В порфиroidных выделениях присутствует кислый плагиоклаз (андезин-олигоклаз). Темноцветные минералы представлены зеленовато-бурым биотитом и хлоритом. В качестве аксессуаров встречаются апатит, алланит, монацит, титанит, эпидот.

Кроме того, в пределах комплекса встречаются интрузивные габбро, габбро-долериты, представленные силлами или штокообразными телами с рвущими стратифицированные толщи контактами. Практически все магматические породы перенесли интенсивный зеленокаменный метаморфизм. Они окварцованы и серицитизированы.

В последнее время нами был получен новый материал по детальной минералогии и изотопно-геохимическим характеристикам магматических пород комплекса, позволяющий с большей детальностью воссоздать условия их формирования [Ковалев и др., 2017, 2018а, 2018б]. Процесс образования магматических пород Шатакского комплекса условно можно подразделить на несколько этапов (стадий):

1 этап (стадия). Поступление недифференцированного мантийного вещества при подъеме плюма и начинающийся рифтогенный процесс активного типа приводят к внедрению расплава в верхние горизонты коры (рис. 3а). *P-T* условия расплава в промежуточном очаге можно реконструировать по составу оливина и клинопироксена пикритов Шатакского комплекса. Выполненные расчеты температур формирования минеральных парагенезисов основывались на оливин-клинопироксеном (*Ol-Cpx*) геотермометре

$$\ln K_{DFe/Mg}^{Ol/Aug} - 78.025 = \frac{-5945.96}{T} - 10.1327 \ln T$$

(при точности $\sigma_T = \pm 6.1^\circ\text{C}$) [Loucks, 1996].

Путем подстановки в формулу

$$T_{Ca-Ol} (^{\circ}\text{C}) = \frac{10539 + 79.8P}{15.45 - \ln Ca^{Ol}} - 273,$$

предложенную в работе [De Hoong et al., 2010], температур, рассчитанных по *Ol-Cpx* геотермометру, было рассчитано давление, при котором сформировались минеральные ассоциации пикритов и пикродолеритов (табл. 1). Согласно полученным материалам, кристаллизация оливина началась при $T = 1100^\circ\text{C}$ и давлении 10–11 кбар.

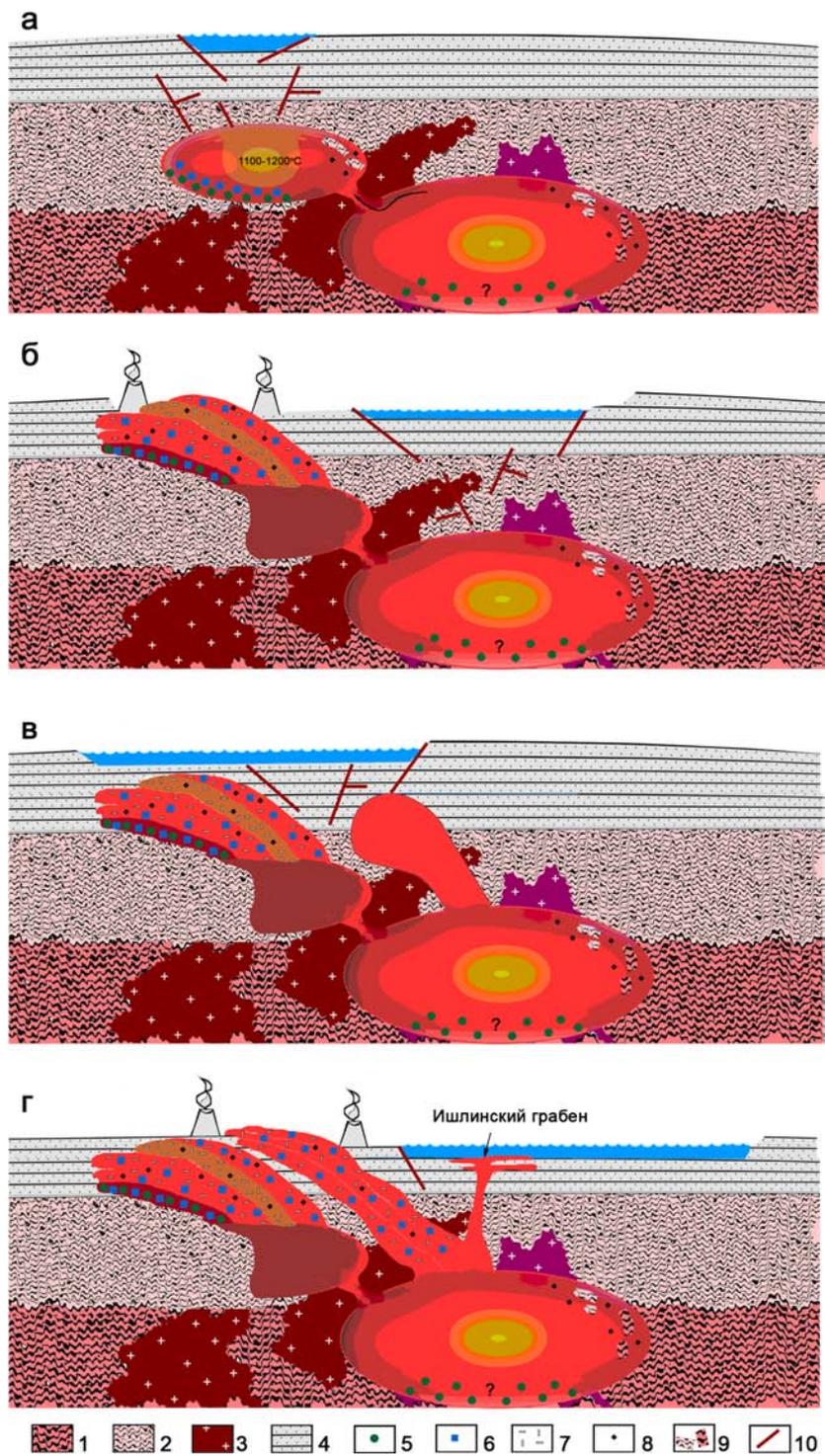


Рис. 3. Модель формирования магматических пород Шатакского комплекса

Условные обозначения: 1–4 — структурно-вещественные комплексы фундамента (1 — архейский, 2 — палеопротерозойский, 3 — гранито-гнейсовые архейско-палеопротерозойские комплексы предполагаемые, 4 — рифейский); 5 — оливин; 6 — пироксен; 7 — плагиоклаз; 8 — ксеногенный циркон; 9 — контаминируемый материал; 10 — тектонические нарушения.

Fig. 3. Model of formation of igneous rocks of the Shatak complex

Legend: 1–4 — structural-material complexes of the basement (1 — Archaean, 2 — Paleoproterozoic, 3 — granite-gneisses of Archean-Paleoproterozoic complexes, 4 — Riphean); 5 — olivine; 6 — pyroxene; 7 — plagioclase; 8 — xenogenic zircon; 9 — contaminated material; 10 — faults.

Таблица 1

Составы оливинов и клинопироксенов и расчетные P-T параметры для пикритов и пикродолеритов Шатакского комплекса

Table 1

Compositions of olivines and clinopyroxenes and calculated P-T parameters for picrites and picrodolerites of the Shatak complex

№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	T, °C	P, kbar
shat_1_ol	37.44	—	—	—	27.29	0.37	34.81	0.2	—	1103.70	10
shat_1_px	51.24	1.19	3.06	—	9.02	0.4	15.76	18.67	0.48		
shat_1_ol	37.42	—	—	—	27.3	0.36	34.82	0.19	—	1103.68	11
shat_1_px	51.24	1.19	3.06	—	9.02	0.4	15.76	18.67	0.48		
shat_1_ol	37.43	—	—	—	27.28	0.37	34.82	0.2	—	1103.85	10
shat_1_px	51.24	1.19	3.06	—	9.02	0.4	15.76	18.67	0.48		
shat_1_ol	37.44	—	—	—	27.29	0.37	34.81	0.2	—	1100.87	9
shat_1_px	51.23	1.19	3.05	0.11	9.01	0.39	15.77	18.65	0.5		
shat_1_ol	37.42	—	—	—	27.3	0.36	34.82	0.19	—	1100.85	10
shat_1_px	51.23	1.19	3.05	0.11	9.01	0.39	15.77	18.65	0.5		
shat_1_ol	37.43	—	—	—	27.28	0.37	34.82	0.2	—	1101.02	9
shat_1_px	51.23	1.19	3.05	0.11	9.01	0.39	15.77	18.65	0.5		
shat_2_ol	37.58	—	—	—	26.03	0.28	35.18	0.18	—	1039.38	5
shat_2_px	51.26	0.94	2.64	0.25	8.97	0.21	15.58	19.68	0.75		
shat_2_ol	37.6	—	—	—	26.01	0.28	35.2	0.17	—	1039.70	6
shat_2_px	51.26	0.94	2.64	0.25	8.97	0.21	15.58	19.68	0.75		
shat_2_ol	37.57	—	—	—	26.04	0.27	35.19	0.18	—	1039.36	5
shat_2_px	51.26	0.94	2.64	0.25	8.97	0.21	15.58	19.68	0.75		
shat_2_ol	37.58	—	—	—	26.03	0.28	35.18	0.18	—	1040.76	5
shat_2_px	51.25	0.95	2.62	0.2	8.98	0.2	15.59	19.68	0.74		
shat_2_ol	37.6	—	—	—	26.01	0.28	35.2	0.17	—	1041.07	6
shat_2_px	51.25	0.95	2.62	0.2	8.98	0.2	15.59	19.68	0.74		
shat_2_ol	37.57	—	—	—	26.04	0.27	35.19	0.18	—	1040.73	5
shat_2_px	51.25	0.95	2.62	0.2	8.98	0.2	15.59	19.68	0.74		

Геологическое строение Шатакского 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 (см. рис. 3а). Эволюция расплава в промежуточных камерах/очагах определялась, по нашему мнению, действием AFC процесса [De Paolo, 1981], который характеризовался фракционированием ликвидусных фаз (оливин ± 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 эволю-

цией Sm-Nd системы в магматических породах Шатакского комплекса, свидетельствующей об ассимиляции расплавом архейских и палеопротерозойских пород (рис. 4).

В это же время в магматическую камеру попадают ксеногенные цирконы из контаминированного вещества, хорошая сохранность кристаллографических форм которых свидетельствует о том, что они представляют собой «магматические» цирконы из архейско-палеопротерозойского гранито-гнейсового субстрата, т.к. для цирконов из терригенных пород Шатакского комплекса характерны окатанные формы [Ковалев и др., 2018б].

2 этап (стадия). На следующем этапе происходит излияние базальтов кузьелгинской подсвиты (см. рис. 3б). Потoki формировались в прибрежной зоне через аппараты центрального типа, о чем

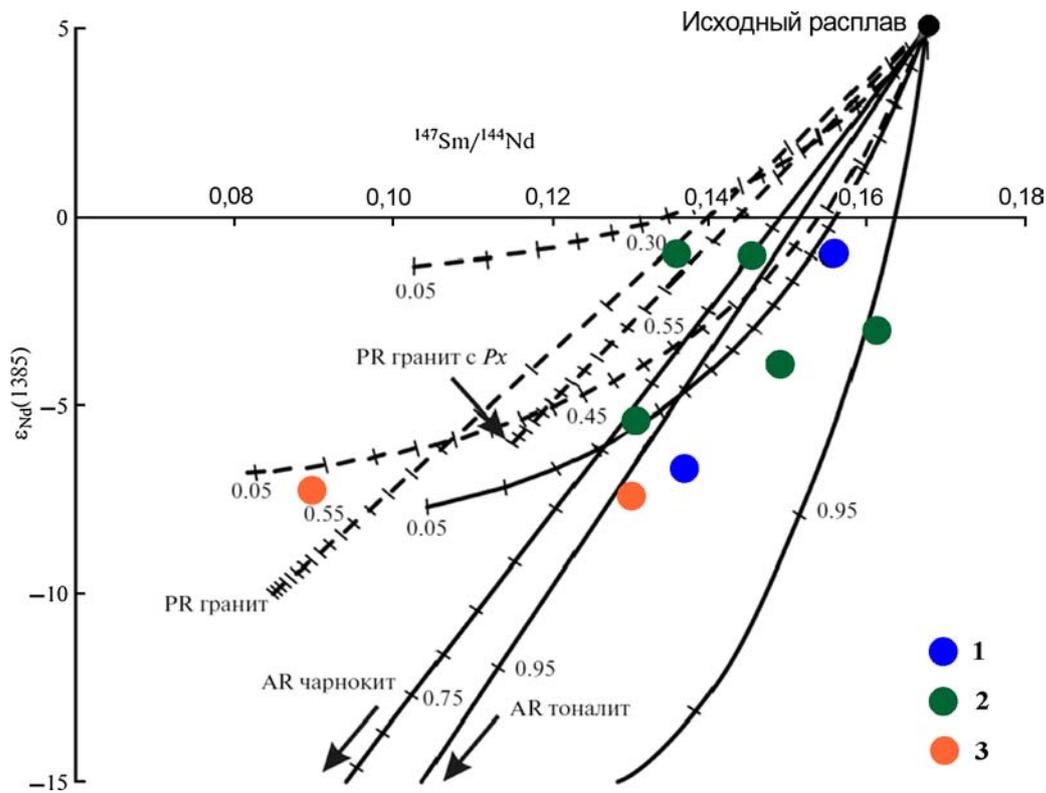


Рис. 4. Диаграмма $\epsilon Nd(T) - {}^{147}Sm/{}^{144}Nd$ для магматических пород Шатакского комплекса (1 — пикриты; 2 — базальты, 3 — риолиты) с линиями смешения и процесса AFC для предполагаемого исходного расплава и разновозрастных коровых контаминантов. По [Носова и др., 2012]

Значения $\epsilon Nd(T)$ рассчитаны для контаминанта на возраст 1385 млн лет. Линии смешения и линии AFC показаны сплошными для архейских контаминантов и пунктирными для палеопротерозойских контаминантов, черточки и цифры на линиях соответствуют доле исходного расплава для модели смешения и доле оставшегося расплава (F) для модели AFC. В качестве архейских контаминантов приняты составы тоналита из скв. Сулеевская [Бибикова и др., 2008] и чарнокита из Тараташского блока [Ларин, 2010]; в качестве палеопротерозойских — два различных гранита из скв. Терсинская [Бибикова и др., 2008].

Fig. 4. Diagram of $\epsilon Nd(T) - {}^{147}Sm/{}^{144}Nd$ for magmatic rocks of the Shatak complex (1 — picrites, 2 — basalts, 3 — rhyolites) with mixing lines and AFC-process for the assumed initial melt and uneven-aged crustal contaminants. By [Nosova et al., 2012]

The values of $\epsilon Nd(T)$ were calculated for the contaminant at the age of 1385 Ma. The mixing lines and AFC lines are shown as solid for Archean contaminants and dotted for Paleoproterozoic contaminants, dashes and numbers on the lines correspond to the proportion of the initial melt for the mixing model and the fraction of the remaining melt (F) for the AFC model. As Archean contaminants, the compositions of tonalite from the well. Suleevskaya [Bibikova et al., 2008] and charnockite from the Taratash block were adopted [Larin, 2011]; as Paleoproterozoic — two different granites from the borehole Tersinskaya [Bibikova et al., 2009].

свидетельствуют находки палеовулканических построек [Парначев и др., 1986]. Вероятнее всего, некоторая часть базальтов внедрилась в слаболитифицированные либо нелитифицированные осадки, чем может объясняться 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 эрохронный возраст магматических пород — 1376 ± 31 млн

лет и Sm-Nd эрохронный возраст риолитов — 1371 ± 110 млн лет [Ковалев и др., 2018a]. 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 (стадия) характеризуется затуханием магматизма во всех его формах (см. рис. 3в). В этот период формируются песчано-сланцевые толщи быковской подсвиты.

4 этап (стадия). На этом этапе происходит излияние основной массы базальтов Шатакского комплекса. Примечательно, что процесс носит дискретный характер; фазы активного вулканизма (калпакская, каранская подсвиты) сменяются накоплением песчано-сланцевого материала (куян-

тавская, шакитарская подсвиты) без видимых проявлений магматизма.

Кроме того, как свидетельствуют материалы по геохимии магматических пород Шатакского комплекса (рис. 5), в базальтах кузьелгинской подсвиты содержится большее количество РЗЭ

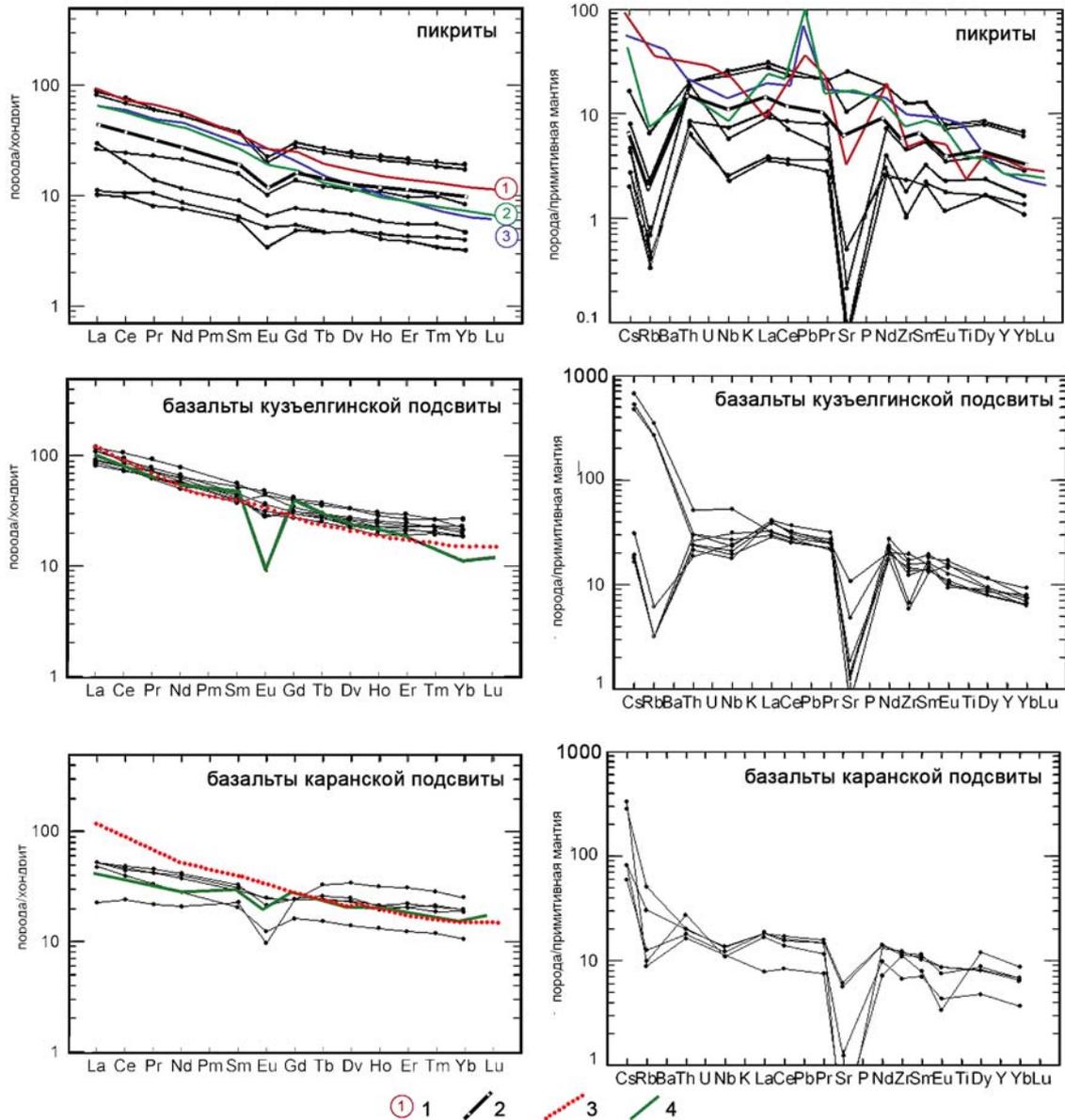


Рис. 5. Графики нормализованных содержаний РЗЭ и спайдер-диаграммы для магматических пород Шатакского комплекса

Условные обозначения: 1 — пикритовые комплексы Башкирского мегантиклинория (1 — Шуйдинский комплекс; 2 — Лапыштинский комплекс; 3 — Мисаелгинский комплекс) по [Ковалев, 2011]; 2 — средний состав пикритов Шатакского комплекса; 3 — внутриплитные базальты (субщелочные оливиновые базальты, вулканический центр Бойна, Эфиопия по [Barberi et al., 1975]); 4 — базальты машакской свиты по [Савельев и др., 2009]. Хондрит и примитивная мантия по [McDonough, Sun, 1995].

Fig. 5. Graphs of normalized REE contents and spider diagrams for igneous rocks of the Shatak complex

Legend: 1 — picritic complexes of the Bashkirian meganticlinorium (1 — Shuydinsky complex, 2 — Lapishty complex, 3 — Misaelginsky complex) by [Kovalev, 2011]; 2 — average composition of picrites of the Shatak complex; 3 — intraplate basalts (subalkaline olivine basalts, Boyne volcanic center, [Barberi et al., 1975]), 4 — basalts of the Mashak Formation [Saveliev et al., 2009], Chondrite and primitive mantle after [McDonough, Sun, 1995].

по сравнению с аналогами из каранской подсветы, что можно объяснить связанностью локальных очагов (см. рис. 3а) и перераспределением части РЗЭ в составе флюидной фазы.

Как было установлено предыдущими работами [Парначев и др., 1986; Савельев и др., 2009] и нашими исследованиями, базальты Шатакской и Машакской палеоструктур характеризуются наличием столбчатой отдельности, свидетельствующей о наземном типе вулканизма. В то же время в Ишлинском грабене (Улуелгинско-Кудашмановская зона) описаны среднерифейские отложения (черносланцевые породы в ассоциации с субвулканическими долеритами, метабазальтами и пирокластикой [Ковалев и др., 2013]), в магматических породах которых присутствует шаровая отдельность. То есть базальтовый магматизм «машакского» времени распространялся и на морские (океанические) пространства (см. рис. 3 г), а приуроченность основной фазы вулканизма к прибрежным районам определялась особенностями структурно-тектонического строения формирующейся рифтовой системы.

Таким образом, приведенный выше материал свидетельствует о том, что генезис всего разнообразия магматических пород Шатакского комплекса (пикритов, базальтов, риолитов) удовлетворяет условиям АФС процесса, заключающегося в фракционировании ликвидусных фаз (оливин ± клинопироксен) и накоплении флюидной фазы в прикровельной части камеры/очага, с одной стороны, и ассимиляции вмещающих пород — с другой.

Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема № 0252-2017-0012).

Список литературы:

- Бибикова Е.В., Богданова С.В., Ларионов А.Н.* Новые данные о раннеархейском возрасте гранитоидов Волго-Уральского сегмента Восточно-Европейского кратона // Доклады РАН. — 2008. — Т. 419, № 2. — С. 219–233.
- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М.* Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геология и геофизика. — 2010. — Т. 51, № 9. — С. 1159–1187.
- Ковалев С.Г.* Новые данные по геохимии диабаз-пикритового магматизма западного склона Южного Урала и условия его формирования // Литосфера. — 2011. — № 2. — С. 68–83.
- Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С.* Изотопно-геохимическое (Rb-Sr, Sm-Nd) изучение магматических пород Шатакского комплекса (Башкирский мегантиклинорий) // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Мат-лы и доклады / 12-я Межрегиональная научно-практическая конференция; Уфа, 21–23 мая 2018 г. — Спб: Свое издательство, 2018а. — С. 256–262.
- Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Высоцкий С.И., Ковалев С.С.* Находки «древних» цирконов в магматических породах Шатакского комплекса (Южный Урал) и их петрогенетические следствия // Доклады РАН. — 2018б. — В печати.
- Ковалев С.Г., Высоцкий И.В., Пучков В.Н., Маслов А.В., Гареев Э.З.* Геохимическая специализация структурно-вещественных комплексов Башкирского мегантиклинория. — Уфа: ДизайнПресс, 2013. — 268 с.
- Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Высоцкий С.И., Ковалев С.С.* Условия образования магматических пород при плюмовом процессе (на примере западного склона Южного Урала) // Доклады РАН. — 2017. — Т. 475, № 2. — С. 171–175.
- Ларин А.М.* Граниты рапакиви и ассоциирующие породы — геология, возраст, источники, минералогия. — СПб., 2010. — 310 с.
- Носова А.А., Сазонова Л.В., Каргин А.В., Ларионова Ю.О., Ковалев С.Г.* Мезопротерозойская внутриплитная магматическая провинция Западного Урала: основные петрогенетические типы пород и их происхождение // Петрология. — 2012. — Т. 20, № 4. — С. 392–428.
- Парначев В.П., Ротарь А.Ф., Ротарь З.М.* Среднерифейская вулканогенно-осадочная ассоциация Башкирского мегантиклинория (Южный Урал). — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. — 105 с.
- Пучков В.Н., Ковалев С.Г.* Плюмовые события на Урале и их связь с субглобальными эпохами рифтогенеза // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. — С. 34–38.
- Савельев Д.Е., Пучков В.Н., Ардисламов Ф.Р., Сначев В.И.* Вулканогенные породы машакской свиты среднего рифея: геология и петрогеохимия // Литосфера. — 2009. — № 4. — С. 3–26.
- Barberi F., Ferrara G., Santacroce R.* A transitional basalt-pantellerite sequence of fractional crystallisation, the Boina centre (Afar rift, Ethiopia) // J. Petrol. — 1975. — No 1. — P. 65–78. — doi.org/10.1093/petrology/16.1.22.
- De Hoog J.C.M., Gall L., Cornell D.H.* Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry // Chemical Geology. — 2010. — P. 196–215. — doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.11.017.
- De Paolo D.J.* Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization // Earth Planet. Sci. Lett. — 1981. — 53. — P. 189–202. — doi.org/10.1016/0012-821x(81)90153-9.
- Ernst R.E.* Large Igneous Provinces. — Cambridge University Press, 2014. — 653 p. — doi.org/10.1017/cbo9781139025300.
- Loucks R.R.* A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer // Contrib Mineral Petrol. — 1996. — V. 125. — P. 140–150. — doi.org/10.1007/s004100050211.
- McDonough W.F., Sun, S.-S.* Composition of the Earth // Chemical Geology. — 1995. — V. 120. — P. 223–253. — DOI: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.

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. The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals // *Lithos.* – 2013. – V. 174. – P. 109–124. – [Doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.021).

Reference:

Barberi F., Ferrara G., Santacroce R. A transitional basalt-pantellerite sequence of fractional crystallisation, the Boina centre (Afar rift, Ethiopia) // *J. Petrol.* 1975. No. 1. P. 65–78. doi.org/10.1093/ptrology/16.1.22.

Bibikova E.V., Fedotova A.A., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., Bogdanova S.V., Larionov A.N., Postnikov A.V., Popova L.P. New data on the early archean age of granitoids in the Volga-Ural segment of the East European craton // *DAN.* 2008. T. 419. No. 1. P. 243–247. DOI: 10.1134/S1028334X08020128.

De Hoog J.C.M., Gall L., Cornell D.H. Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry // *Chemical Geology.* 2010. 270. P. 196–215. doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.11.017.

De Paolo D.J. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. 53. P. 189–202. [doi.org/10.1016/0012-821x\(81\)90153-9](https://doi.org/10.1016/0012-821x(81)90153-9).

Dobretsov N.L., Borisenko A.S., Izokh A.E., Zhmodik S.M. Termokhimicheskaya model' permotriasovykh mantiinykh plyumov Evrazii kak osnova dlya vyavleniya zakonornostei formirovaniya i prognoza medno-nikelevykh, blagorodno- i redkometal'nykh mestorozhdenii [Thermochemical model of permotriatic mantle plumes of Eurasia as a basis for revealing regularities of formation and forecast of copper-nickel, noble and rare metal deposits] // *Geologiya i geofizika.* 2010. T. 51. No. 9. P. 1159–1187. doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.002 (In Russian).

Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge University Press, 2014. 653 p. doi.org/10.1017/cbo9781139025300.

Kovalev S.G. Novye dannye po geokhimii diabaz-pikritovogo magmatizma zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala i usloviya ego formirovaniya [New geochemical data and conditions of formation of diabase-picritic magmatism in the Southern Urals western slope] // *Litosfera.* 2011. No. 2. P. 68–83 (In Russian).

Kovalev S.G., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Izotopno-geokhimicheskoe (Rb-Sr, Sm-Nd) izuchenie magmaticheskikh porod Shatakского комплекса (Bashkirskii megantiklinorii) [Isotope-geochemical (Rb-Sr, Sm-Nd) study of igneous rocks of the Shatak complex (Bashkir meganticlinorium)] // *Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nykh territorii: Mat-ly i doklady / 12-ya Mezhhregional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya; Ufa, May, 21–23, 2018.* Saint-Peterburg: Svoe izdatelstvo, 2018a. P. 256–262 (In Russian).

Kovalev S.G., Puchkov V.N., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Nakhodki "drevnikh" tsirkonov v magmaticheskikh porodakh

Shatakского комплекса (Yuzhnyi Ural) i ikh petrogeneticheskie sledstviya [Finds of «ancient» zircons in igneous rocks of the Shatak complex (Southern Urals) and their petrogenetic consequences] // *DAN,* 2018b. [In print].

Kovalev S.G., Vysotsky I.V., Puchkov V.N., Maslov A.V., Gareev E.Z. Geokhimicheskaya spetsializatsiya strukturno-veshchestvennykh kompleksov Bashkirskogo megantiklinorii. [Geochemical specialization of structural-material complexes of the Bashkir meganticlinorium] Ufa: DizainPress, 2013. 268 p. (In Russian).

Kovalev S.G., Puchkov V.N., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Conditions of formation of igneous rocks in plume magmatism at the example of the western slope of the Southern Urals // *DAN.* 2017. T. 475, No. 1. P. 743–747. doi.org/10.1134/s1028334x17070169.

Larin A.M. Granity rapakivi i assotsiiruyushchie porody — geologiya, vozrast, istochniki, minerageniya. [Granites of rapakivi and associated rocks — geology, age, springs, mineralogy] SPb., 2010. 310 p. (In Russian).

Loucks R.R. A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer // *Contrib Mineral Petrol.* 1996. V. 125. P. 140–150. doi.org/10.1007/s004100050211.

McDonough W.F., Sun S.-S. Composition of the Earth // *Chemical Geology.* 1995. V. 120. P. 223–253. DOI: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.

Nosova A.A., Kargin A.V., Larionova Y.O., Sazonova L.V., Gorozhanin V.M., Kovalev S.G. Mesoproterozoic within-plate igneous province of the western urals: Main petrogenetic rock types and their origin // *Petrology.* 2012. V. 20, No. 4. P. 356–390. doi.org/10.1134/s086959111204008x.

Parnachev V.P., Rotar' A.F., Rotar' Z.M. Srednerifeiskaya vulkanogenno-osadochnaya assotsiatsiya Bashkirskogo megantiklinorii (Yuzhnyi Ural). [The Middle Riphean volcanogenic-sedimentary association of the Bashkir meganticlinorium (Southern Urals)] Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1986. 105 p. (In Russian).

Puchkov V.N., Kovalev S.G. Plyumovye sobytiya na Urale i ikh svyaz' s subglobal'nymi epokhami riftogeneza [Plume events in the Urals and their relationship to the subglobal epochs of rifting] // *V sb. ontinental'nyi riftogenez, sputstvuyushchie protsessy.* Irkutsk: IZK SO RAS, 2013. P. 34–38 (In Russian).

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. The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals // *Lithos.* 2013. V. 174. P. 109–124. doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.021.

Savel'ev D.E., Puchkov V.N., Ardislamov F.R., Snachev V.I. Vulkanogennye porody mashakskoi svity srednego rifeya: geologiya i petrogeokhimiya [Volcanic rocks of Middle Riphean Mashak suite: Geology and petrogeochemistry] // *Litosfera.* 2009. No. 4. P. 3–26 (In Russian).

Сведения об авторах:

Ковалев Сергей Григорьевич, доктор геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа.
E-mail: kovalev@ufaras.ru

Высоцкий Сергей Игоревич, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа

Ковалев Сергей Сергеевич, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа

About the authors:

Kovalev Sergei Grigor'evich, Doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: kovalev@ufaras.ru

Vysotsky Sergei Igorevich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa

Kovalev Sergei Sergeevich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa