

«ДРЕВНИЕ» ЦИРКОНЫ В МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОДАХ ШАТАКСКОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ): МОРФОЛОГИЯ И ГЕНЕЗИС

© 2019 г. С. Г. Ковалев, С. И. Высоцкий, С. С. Ковалев

Реферат. В работе приводятся новые данные о находках «древних» цирконов в магматических породах Шатакского комплекса. На основе изучения морфологии кристаллов показано, что цирконы из базальтоидов комплекса относятся к магматическим, измененным вторичными процессами. Делается вывод о том, что «древние» цирконы представляют собой ксеногенный материал архейско-палеопротерозойского гранито-гнейсового субстрата, попавший в расплав при контаминации в результате действия AFC (assimilation and fractional crystallization) процесса, который характеризовался фракционированием ликвидусных фаз (оливин ± клинопироксен), накоплением флюидной фазы в прикровельной части камеры/очага с одной стороны, и ассимиляцией вмещающих пород — с другой.

Ключевые слова: Южный Урал, базальты, цирконы, U-Pb датирование, магматический расплав, фракционирование, ассимиляция

“ANCIENT” ZIRCONS IN MAGMATIC ROCKS OF THE SHATAK COMPLEX (SOUTH URALS): MORPHOLOGY AND GENESIS

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

Abstract. The paper presents new data on the discoveries of “ancient” zircons in igneous rocks of the Shatak complex. Based on the study of morphology of the crystals, it was shown that the zircons from the basaltoids of the complex belong to igneous type, modified by secondary processes. It is concluded that the “ancient” zircons are xenogenic material of the Archean-Paleoproterozoic granite-gneiss substrate, which melted during contamination as a result of the AFC process, which was characterized by a fractionation of liquidus phases (olivine ± clinopyroxene) and accumulation of a fluid phase in the roofing section of the chamber on the one hand, and the assimilation of host rocks on the other.

Keywords: South Ural, basalts, zircons, U-Pb dating, magmatic melt, fractionation, assimilation

Введение

Шатакский комплекс представляет собой вулканогенно-осадочную ассоциацию, относящуюся к машакской свите (RF₂) и залегающую в основании среднерифейского разреза Башкирского мегантиклинория (рис. 1). Комплекс состоит из осадочных и магматических пород, первые из которых составляют около 75% его объема и представлены преимущественно грубозернистыми разностями: конгломератами и песчаниками. Тонкозернистые разновидности — алевролиты, алевросланцы и слан-

цы встречаются относительно редко. Конгломераты присутствуют на нескольких стратиграфических уровнях. Они сложены хорошо окатанными, часто шарообразными обломками кварцитопесчаников и кварцитов. В нижних горизонтах фиксируются галька и дресва подстилающих пород юшинской свиты нижнего рифея. Цемент конгломератов представлен кварцевым материалом и серицит-хлоритовой массой. Песчаники имеют существенно кварцевый состав и на 80–90% состоят из обломков кварца с хлорит-серицитовым цементом. Алевролиты, алевросланцы и сланцы встречаются

Для цитирования: Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. «Древние» цирконы в магматических породах Шатакского комплекса (Южный Урал): морфология и генезис // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 45–54. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-3>.

For citation: Kovalev S.G., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. “Ancient” zircons in magmatic rocks of the Shatak complex (South Urals): morphology and genesis // *Geologicheskii vestnik*. 2019. No. 1. P. 45–54. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-3>.

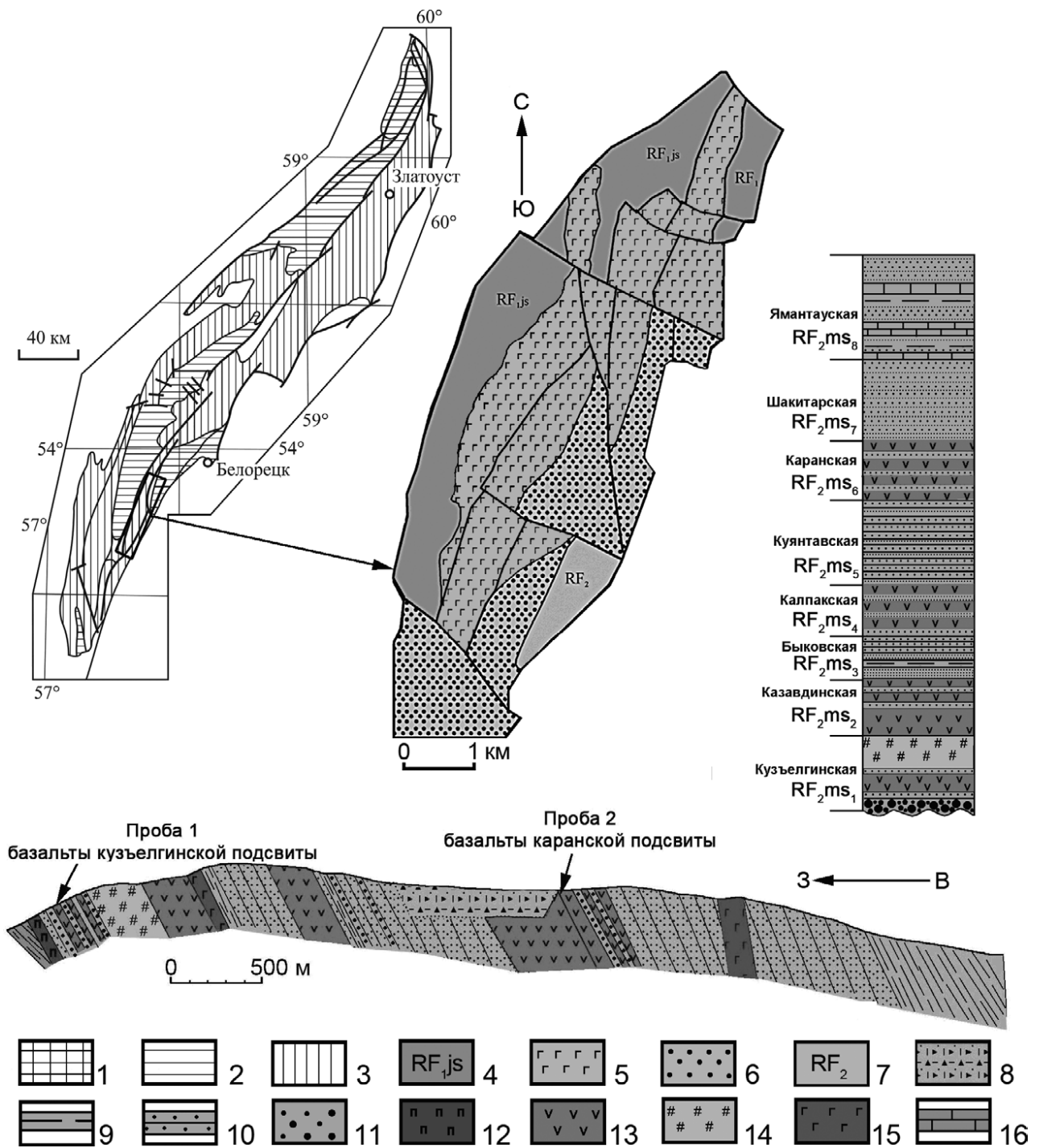


Рис. 1. Геологические схемы, разрез и стратиграфическая колонка Шатакского комплекса. По [Ковалев и др., 2018]

Условные обозначения: 1–7 — геологические схемы (1 — архейско-палеопротерозойские породы (тараташский комплекс); 2–7 — отложения: 2 — раннерифейские, 3 — среднерифейские, 4 — юшинской свиты RF₁, 5 — машакской свиты RF₂, 6 — зигальгинской свиты RF₂, 7 — авзянской свиты RF₂); 8–16 — разрез (8 — кора выветривания; 9 — сланцы, алевролиты; 10 — песчаники; 11 — конгломераты; 12 — пикриты; 13 — базальты; 14 — риолиты; 15 — интрузивные долериты; 16 — известняки).

Fig. 1. Geological schemes, section and stratigraphic column of the Shatak complex. By [Kovalev et al., 2018]

Notes: 1–7 — for geological schemes (1 — Archean-Paleoproterozoic rocks (taratash complex); 2–7 — deposits: 2 — Lower Riphean, 3 — Middle Riphean, 4 — Yusha Formation RF₁, 5 — Mashak Formation RF₂, 6 — Zigalga Formation RF₂, 7 — Avzian Formation RF₂); 8–16 — for the section (8 — weathering crust; 9 — shale, siltstone; 10 — sandstone; 11 — conglomerate; 12 — picritic; 13 — basalt; 14 — rhyolite; 15 — intrusive dolerite; 16 — limestone).

в тонком переслаивании друг с другом. Относительно редко они слагают самостоятельные мало-мощные горизонты и пачки.

Вулкано-интрузивные породы Шатакского комплекса представлены пикритами, базальтами и риолитами [Парначев и др., 1986; Ковалев, Высоцкий, 2006, 2008]. Пикриты в виде пластовой интрузии мощностью около 25–30 м приурочены к основанию комплекса, располагаясь непосредственно на границе с подстилающими отложениями юшинской свиты (RF_1). С некоторой долей условности в теле можно выделить три зоны: нижнюю эндоконтактовую, центральную и верхнюю эндоконтактовую. Породы верхней эндоконтактовой зоны относятся к метадолеритам, имеющим микрофитовую и микродолеритовую структуру. Центральная часть сложена пикритами, которые практически полностью превращены в тальк-амфибол-серпентиновый агрегат. По псевдоморфозам в них устанавливаются оливин, клинопироксен, ортопироксен и роговая обманка. Нижний эндоконтакт представлен метаморфизованными пикродолеритами. Из первичных минералов устанавливаются клинопироксен и плагиоклаз. Вторичные минералы — амфибол, лейкоксен, хлорит, серпентин, альбит, карбонат, тальк и серицит.

Базальты Шатакского комплекса характеризуются микродолеритовой, микрофитовой, апоинтерсертальной и порфирированной структурой и массивной текстурой, часто со столбчатой отдельностью. Минеральный состав включает в себя клинопироксен, плагиоклаз, роговую обманку, титаномагнетит и магнетит. Ассоциация вторичных минералов состоит из амфибола актинолит-тремолитового ряда, хлорита (пеннин — клинохлор), эпидота, серицита, титанита, лейкоксена и гематита.

Риолиты, залегающие в верхней части кузьелгинской подсвиты в виде самостоятельного горизонта, светло-серые с порфирированной флюидальной и шлирово-такситовой структурой. Их основная масса сложена мелкозернистым кварц-полевошпатовым агрегатом, а в порфирированных выделениях присутствует кислый — средний плагиоклаз (андезин — олигоклаз). Темноцветные минералы представлены биотитом и хлоритом (пеннин — клинохлор). В качестве аксессуаров установлены апатит, алланит, монацит, титанит и эпидот.

Также в пределах комплекса встречаются силы и штокообразные тела с рвущими стратифицированными толщами контактами, сложенные долеритами и габбро-долеритами. Практически все

магматические породы претерпели интенсивный зеленокаменный метаморфизм с развитием локальных зон окварцевания и серицитизации.

Проведенное ранее датирование магматических пород Шатакского комплекса по единичным кристаллам цирконов на SHRIMP-II (ВСЕГЕИ) показало присутствие в пробах нескольких популяций минерала с возрастом от 1500–1550 до 1330–1350 млн лет [Пучков и др., 2009; Пучков, 2010]. Возрастные данные, полученные методом CA-TIMS (CA-ID-TIMS) по 4 зернам циркона из метабазальтов, дали средневзвешенную $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ датировку 1381.5 ± 1.0 млн лет ($\text{MSWD} = 1.0$) и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ датировку 1380.3 ± 0.4 млн лет ($\text{MSWD} = 1.1$) [Пучков, 2010], что и было принято за возраст магматических пород комплекса. Вместе с тем в этих же пробах обнаружены цирконы с архейскими (3629 ± 44 ; 3358 ± 47 ; 3341 ± 43 ; 2948 ± 40 млн лет) и палеопротерозойскими ($1707 - 1677 \pm 48$ млн лет) возрастными [Пучков и др., 2009, 2011]. Нами получены новые материалы по U-Pb датированию цирконов из магматических пород комплекса [Kovalev et al., 2018], которые позволяют предложить непротиворечивую модель, объясняющую присутствие «древних» цирконов в породах комплекса.

Методика исследований

U-Pb датирование цирконов осуществлялось на вторично-ионном микрозонде SIMS SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ФГБУ ВСЕГЕИ. Подробное изучение кристаллов циркона позволило осуществить выбор достаточного количества участков (точек) для анализа, в максимальной степени отвечающих гомогенным, свободным от включений, вторичных изменений и механических повреждений доменам зерен, соответствующих процессу магматической кристаллизации циркона. В целом по 30 кристаллам из двух проб проведено 40 локальных изотопных анализов. Все датированные цирконы однородны и характеризуются отсутствием воздействия вторичных процессов на U-Pb изотопную систему, практически все полученные значения возраста конкордантны, т.е. совпадают по независимым изотопным системам $^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}-^{235}\text{U}$.

Результаты исследований

Для датирования пород Шатакского комплекса были отобраны 2 пробы базальтоидов из кузьелгинской и каранской подсвит. Как видно из

рис. 2, большая часть выделенных цирконов представлена хорошо ограненными зональными кристаллами цирконового (призматического) и гиацитного габитуса. Кроме того встречаются короткопризматические кристаллы (см. рис. 2: 7.2, 13.2) с развитыми гранями $\{111\}$ и $\{311\}$, дипирамидаль-

ные с развитой гранью $\{101\}$ (см. рис. 2: 4.2, 14.2), а также обломки копьевидной призматической формы (см. рис. 2: 6.1, 3.2, 12.2, 15.2). Если исходить из положений о том, что тонкая зональность характерна обычно для циркона, кристаллизующегося из расплава [Носырев и др., 1989], а в неизменен-

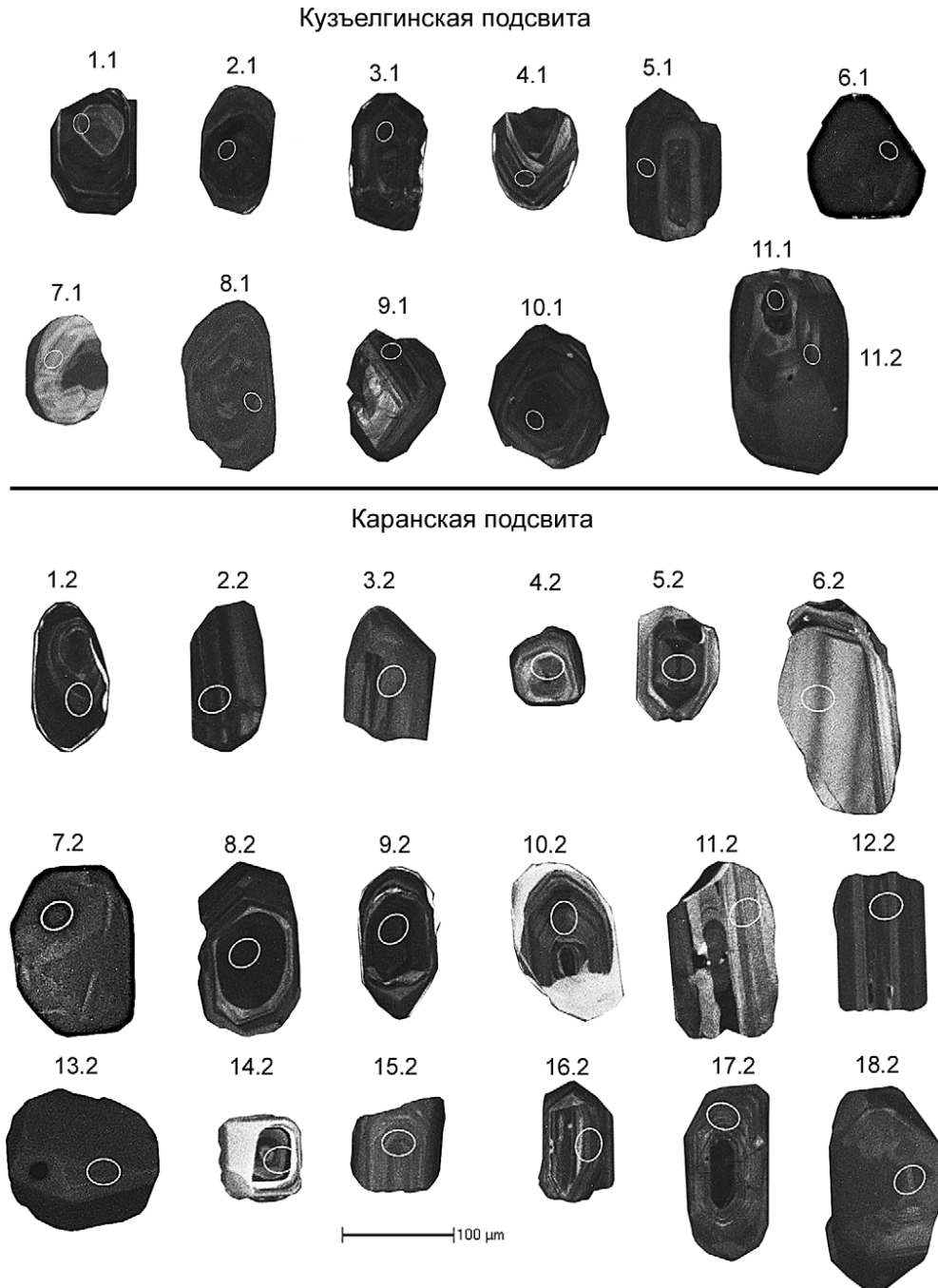


Рис. 2. Катодолуминесцентные микрофотографии цирконов из базальтоидов кузьелгинской и каранской подсвит Шатакского комплекса

Fig. 2. Cathodoluminescent microphotographs of zircons from the basalts of the Kuz'elga and Karan districts of the Shatak complex

ных наложенными процессами гранитах цирконный морфотип относится к раннемагматической генерации, гиацинтовый — к позднемагматической, копьевидный — к пегматитовой, торпедовидный — к пневматолитовой, циртолитовый — к гидротермальной [Пыстина, Пыстин, 2018], то практически все цирконы из базальтоидов Шатакского комплекса следует отнести к магматическим, измененным вторичными процессами.

При анализе внутреннего строения кристаллов циркона из пород Шатакского комплекса обращает на себя внимание тот факт, что наряду с четко проявленной эвгедральной зональностью существует как минимум две разновидности ядер минералов. Первая — это ограниченные ядра призматического габитуса (см. рис. 2: 5.1, 10.1, 17.1), и вторая — ядра изометричной, округлой формы (см. рис. 2: 1.1, 1.2, 8.2). В первом случае зарождение и, возможно, рост кристаллов происходил из магматического расплава, а во втором — ситуация не так очевидна, так как существует вероятность формирования «округлости» как за счет частичного растворения ребер и вершин кристаллов, так и образование первично изометричных форм («фут-

больный мяч») в результате метаморфических процессов [Каулина, 2010]. В отдельных кристаллах присутствует радиальная секториальная зональность (см. рис. 2: 7.2, 11.1, 18.2), что обусловлено, вероятнее всего, перекристаллизацией циркона предыдущей генерации (детритового или магматического циркона протолита).

В целом следует констатировать, что морфологической особенностью изученных цирконов является практически полное отсутствие кристаллов «гранулитового» типа, которые широко распространены в полиметаморфических комплексах Урала [Краснобаев, 1986; Пыстина, Пыстин, 2002].

Торий-урановое отношение считается значимым критерием для определения обстановок образования циркона в магматических, метаморфических и гидротермальных условиях [Бибикина, 1989; Belousova et al., 2002; Rubatto, 2002; Hoskin, Schaltegger, 2003]. Для магматических цирконов концентрации Th и U зависят от содержаний этих элементов в среде кристаллизации, что характеризует состав источника, из которого кристаллизуются минералы. Как видно из приведенной таблицы и рис. 3а,

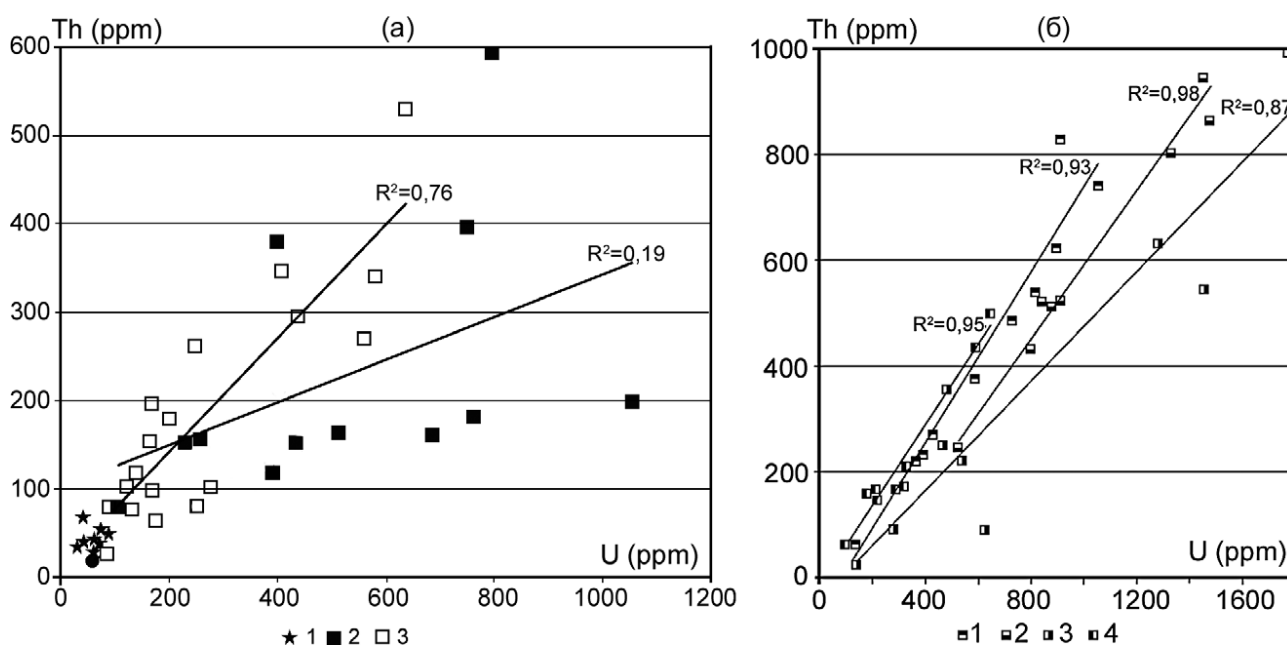


Рис. 3. Диаграммы Th–U для цирконов Шатакского комплекса (а) и гранитоидов северной части Приполярного Урала (б)
 Диаграмма (а): 1 — цирконы из базальтов машакской свиты, по [Пучков, 2010]; 2 — цирконы из базальтоидов кузельгинской подсвиты; 3 — цирконы из базальтоидов куранской подсвиты. Диаграмма (б): 1 — Николайшорский массив; 2 — Кожимский массив; 3 — Хаталамбо-Лапчинский массив; 4 — Лапчавожский массив. 1–4 — по [Пыстина, Пыстин, 2018, табл. 2].

Fig. 3. Th–U diagrams for zircons of the Shatak complex (а) and granitoids of the northern part of the Subpolar Urals (б)
 Chart (а): 1 — zircons from basalts of the Mashak Formation [Puchkov, 2010]; 2 — zircons from basaltoids of the Kuz'elga Subformation; 3 — zircons from basaltoids of the Caran Subformation. Chart (б): 1 — Nikolashor massif; 2 — Kozhimsky massif; 3 — Khatalambo-Lapchinsky massif; 4 — Lapchavozhsky massif. 1–4 — by [Pystina, Pystin, 2018, table 2].

содержания урана, тория и Th/U в цирконах из кузельгинской и каранской подсвит Шатакского комплекса подвержены значительным вариациям (U — 106–1055 ppm, Th — 80–595 ppm, Th/U — 0.19–0.98 в цирконах кузельгинской подсвиты и U — 86–639 ppm, Th — 28–529 ppm, Th/U — 0.33–1.21 в цирконах каранской подсвиты). Приме-

чительно, что концентрации этих элементов в изученных цирконах в значительной степени превышают содержания урана и тория в цирконах из базальтов Шатакского комплекса (см. рис. 3а), исследованных В.Н. Пучковым с соавторами [Пучков, 2010]. Из этой же диаграммы следует, что для цирконов каранской подсвиты характерна прямая

Таблица

Результаты U-Pb SIMS-SHRIMP анализов цирконов из магматических пород кузельгинской и каранской подсвит Шатакского комплекса

Table

The results of the U-Pb SIMS-SHRIMP analyzes of zircons from igneous rocks of the Kuz'elga and Karan subassemblies of the Shatak complex

№ п/п	№ обр.	$^{206}\text{Pb}_c$, %	U, ppm	Th, ppm	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$, ppm	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, Age
1	1-6.1	0.04	1055	199	0.19	237	1496
2	1-11.2	0.08	230	154	0.69	60.9	1728
3	1-8.1	0.02	750	398	0.55	213	1838
4	1-3.1	0.04	685	161	0.24	193	1823
5	1-10.1	0.01	391	119	0.31	113	1865
6	1-7.1	0.12	106	80	0.78	32.8	1972
7	1-1.1	0.02	434	154	0.37	136	2001
8	1-11.1	3.29	513	164	0.33	125	1563
9	1-5.1	0.02	761	181	0.25	258	2142
10	1-2.1	0.33	795	595	0.77	286	2252
11	1-4.1	0.02	258	156	0.63	115	2692
12	1-9.1	0.00	401	380	0.98	217	3152
13	2-8.1	0.01	581	340	0.61	135	1539
14	2-7.1	0.02	276	102	0.38	79.6	1868
15	2-17.1	0.05	169	97	0.59	49.8	1903
16	2-12.1	0.02	561	270	0.50	172	1966
17	2-1.1	0.05	408	347	0.88	120	1901
18	2-10.1	0.00	249	262	1.09	79.2	2032
19	2-4.1	0.01	202	180	0.92	63.3	2000
20	2-14.1	0.10	133	80	0.62	41.8	2006
21	2-3.1	0.01	179	64	0.37	56.1	2000
22	2-5.1	0.05	169	197	1.21	53.1	2012
23	2-18.1	0.09	141	118	0.87	44.1	2004
24	2-2.1	0.00	440	293	0.69	137	1989
25	2-9.1	0.04	639	529	0.86	201	2009
26	2-13.1	0.02	163	154	0.98	66.9	2518
27	2-11.1	0.09	89	79	0.92	37.5	2579
28	2-16.1	0.03	252	81	0.33	111	2670
29	2-15.1	0.07	122	103	0.88	55.7	2748
30	2-6.1	0.05	86	28	0.33	40	2798

Примечание. № 1–12 — кузельгинская подсвита; № 13–30 — каранская подсвита; Pb_c and Pb^* обозначают нерадиоогенный и радиоогенный свинец, соответственно.

Note. No. 1–12 — Kuz'yelga Subformation; No. 13–30 — Karan Subformation; Pb_c and Pb^* denote non-radiogenic and radiogenic lead, respectively.

зависимость между содержаниями U и Th с коэффициентом аппроксимации 0.76, в то время как для минералов из базальтоидов кузельгинской подсвиты какая-либо зависимость между этими элементами отсутствует (коэффициент аппроксимации 0.19) и точки на диаграмме располагаются бессистемно (см. рис. 3а). В связи с этим представляется интересным сравнить содержания и конфигурацию графиков для урана и тория из гранитных массивов северной части Приполярного Урала (см. рис. 3б), опубликованных Ю.И. Пыстиной и А.М. Пыстиным [2018], с полученными нами материалами. Как видно из приведенного графика (см. рис. 3б), для цирконов всех гранитных массивов характерна четко проявленная прямая корреляция между ураном и торием с очень высокими коэффициентами аппроксимации (0.87–0.98), что, вероятнее всего, обусловлено особенностями процесса кристаллизации минерала из гранитного расплава при закономерном снижении количеств U и Th в процессе минералообразования за счет их «связывания» в кристаллизующихся минералах. Аналогичная тенденция, установленная для цирконов из базальтоидов каранской подсвиты (см. рис. 2), может свидетельствовать об их принадлежности к гранитоидам, контаминированным магматическим расплавом при его эволюции в промежуточном очаге.

Возраст цирконов был определен для обеих групп минералов. Для 5 зерен из базальтоидов кузельгинской подсвиты получены два дискордантных возраста — 1985 ± 16 ($n=2$) и 1892.4 ± 9.7 ($n=3$) млн лет (рис. 4а, б). В целом же разброс возрастов единичных кристаллов по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ располагается в интервале 1496–3152 млн лет с «максимумом» ~1900 млн лет, а возрастные интервалы соответствуют: 1496–1563 млн лет; 1728–1865 млн лет; 1972–2001 млн лет; 2142–2252 млн лет; 2692 млн лет и 3152 млн лет. Конкордантный возраст, построенный по 7 зернам цирконов из каранской подсвиты, соответствует 2003.2 ± 9.7 млн лет (см. рис. 4в), а разброс возрастов единичных кристаллов по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ располагается в интервале 1539–2798 млн лет с «максимумом» ~2 млрд лет. При этом

возрастные интервалы для цирконов каранской подсвиты близки к аналогам из кузельгинской подсвиты, но не тождественны: 1539 млн лет; 1869–1966 млн лет; 2000–2032 млн лет; 2518–2579 млн лет; 2670 млн лет; 2748–2798 млн лет. Здесь же необходимо подчеркнуть, что, как видно из рис. 2, часто кратеры от единичных анализов захватывают несколько зон роста кристаллов, т.е. мы имеем некие интегральные значения возрастов,

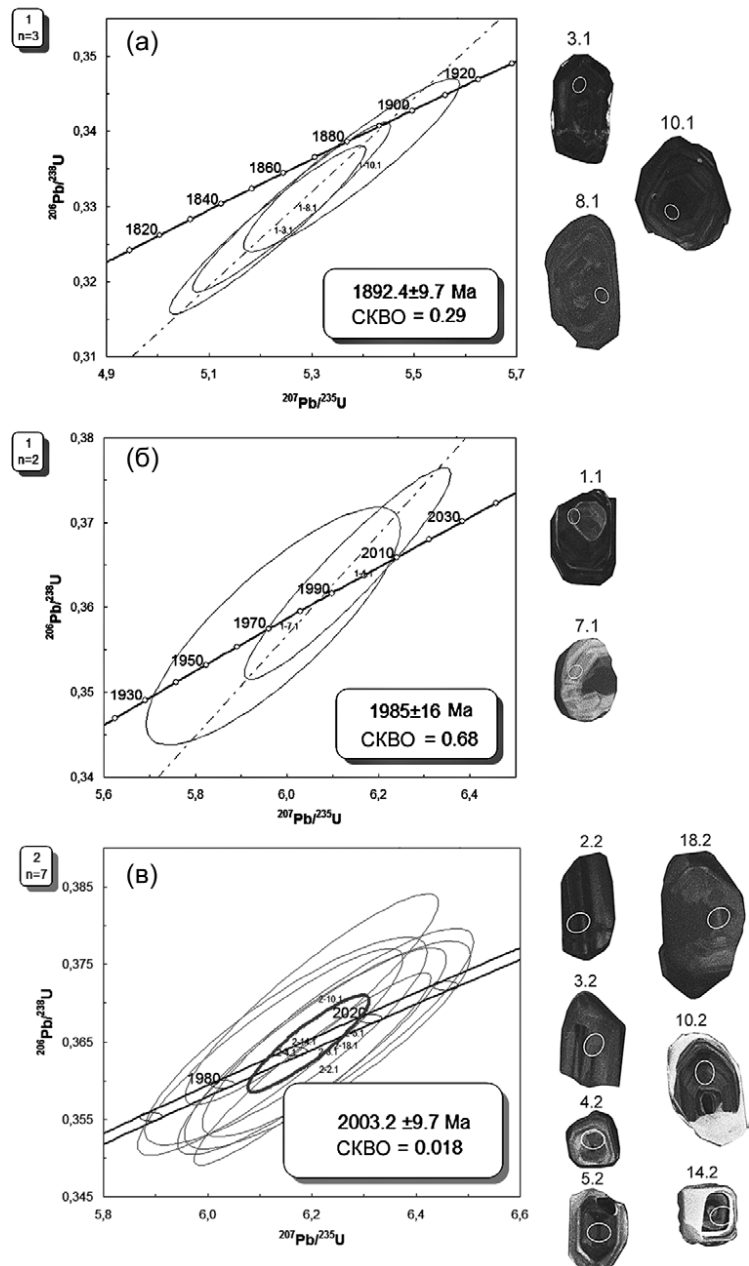


Рис. 4. Диаграммы с дискордией (а), (б) и конкордией (в) для цирконов и магматических пород Шатакского комплекса

Fig. 4. Diagrams with discordia (a), (b) and concordia (v) for zircons and igneous rocks of the Shatak complex

и если оценивать картину в целом, то необходимо констатировать, что большая часть цирконов имеет возраст близкий к 2 млрд лет.

Обсуждение результатов

Сложившаяся ситуация, когда в породах Шатакского комплекса обнаружено не просто значительное, а преобладающее количество цирконов с возрастными, противоречащими геологическим материалам, требует своего разрешения. Нами предлагается следующая модель, объясняющая изложенный выше материал.

В рифейской истории западного склона Южного Урала среднерифейский этап являлся временем с максимальным развитием магматизма на обширной территории, выходящей далеко за пределы Южного Урала (Восточно-Европейская платформа, Тиман, Гренландия, Сибирский кратон), и представлял собой событие субглобального масштаба, свидетельствующее о его плюмовой/суперплюмовой природе [Пучков, Ковалев, 2013]. В это время поступление недифференцированного мантийного вещества при подъеме плюма и связанный с ним рифтогенный процесс активного типа приводят к внедрению расплава в верхние горизонты коры. P-T условия расплава в промежуточном очаге реконструируются по составу оливина и клинопироксена пикритов Шатакского комплекса, согласно которым кристаллизация оливина началась при $T = 1100^\circ\text{C}$ и давлении 10–11 кбар [Ковалев и др., 2017]. Геологическое строение Шатакского комплекса, а именно наличие базальтов и риолитов в кузельгинской подсвете и базальтов в казавдинской, калпакской и каранской подсветах, различающихся по времени излияния, позволяет предполагать существование нескольких взаимосвязанных промежуточных очагов. Эволюция расплава в промежуточных камерах определялась, по нашему мнению, действием AFC процесса (assimilation and fractional crystallization) [De Paolo, 1981], который характеризовался фракционированием ликвидусных фаз (оливин \pm клинопироксен), 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 Шатакского комплекса, свидетельствующей о контаминации расплава архейскими и палеопротерозойскими

породами [Ковалев и др., 2018]. В процессе контаминации в магматическую камеру попадают ксеногенные цирконы из ассимилированного вещества. Причем установленные в ряде публикаций U-Pb возраста цирконов из субстрата тараташского метаморфического комплекса [Ронкин и др., 2012] и обломочных цирконов из базальных уровней стратотипа рифея [Кузнецов и др., 2013] практически полностью идентичны возрастным интервалам, приведенным выше. Хорошая сохранность кристаллографических форм цирконов свидетельствует о том, что они представляют собой «магматические» минералы из архейско-палеопротерозойского гранито-гнейсового субстрата.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что находки «древних» цирконов в магматических породах Шатакского комплекса могут быть объяснены реализацией AFC процесса при эволюции расплава в промежуточных очагах и свидетельствуют о том, что породы тараташского комплекса могут служить аналогом фундамента, распространенного (по крайней мере, в среднерифейское время) под всей западной палеоконтинентальной частью Южного Урала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-45-020045.

Список литературы:

- Бибикова Е.В. U-Pb геохронология ранних этапов развития древних щитов. — М.: Наука, 1989. — 180 с.
- Каулина Т.В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. — Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2010. — 144 с.
- Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новый тип благородно-металлической минерализации в терригенных породах Шатакского грабена (западный склон Южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. — 2006. — № 4. — С. 415–421.
- Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новые данные по геологии Шатакского комплекса (западный склон Южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. — 2008. — № 3. — С. 280–289.
- 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. — СПб: Свое издательство, 2018. — С. 256–262.
- 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) // ДАН. — 2017. — Т. 475, № 2. — С. 171–175. — doi.org/10.7868/S0869565217200129.
- Краснобаев А.А. Циркон как индикатор геологических процессов. — М.: Наука, 1986. — 152 с.

Кузнецов Н.Б., Маслов А.В., Белоусова Е.А., Романюк Т.В., Крупенин М.Т., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Серегина Е.С., Цельмович В.А. Первые результаты U–Pb LA–ICP–MS–изотопного датирования обломочных цирконов из базальных уровней стратотипа рифея // ДАН. – 2013. – Т. 451, № 3. – С. 308–313. – doi.org/10.7868/S0869565213210226.

Носырев И.В., Робул В.М., Орса В.И. Генерационный анализ акцессорного циркона. – М.: Наука, 1989. – 203 с.

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. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. – 280 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.

Пучков В.Н., Козлов В.И., Краснобаев А.А. Палеозойские U–Pb SHRIMP–датировки магматических пород Башкирского мегантиклинория // Геологический сборник № 9 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2011. – С. 36–43.

Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Шмитц М., Козлов В.И., Давыдов В.И., Лепехина Е.Н., Нехорошева А.Г. Новые U–Pb датировки вулканитов машакской свиты рифея Южного Урала и их сравнительная оценка // Геологический сборник № 8 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2009. – С. 3–14.

Пыстина Ю.И., Пыстин А.М. Цирконовая летопись Уральского докембрия. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 167 с.

Пыстина Ю.И., Пыстин А.М. Распределение U и Th в цирконах метаморфических пород и гранитоидов севера Урала // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. – СПб: Свое издательство, 2018. – С. 294–299.

Ронкин Ю.Л., Синдерн С., Лепехина О.П. Изотопная геология древнейших образований Южного Урала // Литосфера. – 2012. – № 5. – С. 50–76.

Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2002. – V. 143. – P. 602–622. – doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7.

De Paolo D.J. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization // Earth and Planetary Science Letters. – 1981. – V. 53. – P. 189–202. – doi.org/10.1016/0012-821x(81)90153-9.

Hoskin P.W.O., Schaltegger U. The Composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // Reviews in mineralogy & geochemistry. – 2003. – V. 53. – P. 27–62. – doi.org/10.2113/0530027.

Kovalev S.G., Puchkov V.N., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Finds of “Ancient” Zircons in Magmatic Rocks of the Shatak

Complex (Southern Urals) // Doklady Earth Sciences. – 2018. – V. 482. – No. 2. – P. 1270–1274. – doi.org/10.1134/s1028334x18100124.

Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism // Chemical Geology. – 2002. – V. 184. – P. 123–138. – doi.org/10.1016/s0009-2541(01)00355-2.

References:

Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2002. V. 143. P. 602–622. doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7.

Bibikova E.V. U–Pb geokhronologiya rannikh etapov razvitiya drevnikh shchitov [U–Pb geochronology of the early stages of the development of ancient shields]. M.: Science, 1989. 180 p. (in Russian).

De Paolo D.J. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization // Earth and Planetary Science Letters. 1981. V. 53. P. 189–202. doi.org/10.1016/0012-821x(81)90153-9.

Hoskin P.W.O., Schaltegger U. The Composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // Zircon: Reviews in mineralogy & geochemistry. 2003. V. 53. P. 27–62. doi.org/10.2113/0530027.

Kaulina T.V. Obrazovanie i preobrazovanie tsirkona v polimetamorficheskikh kompleksakh [Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes]. Apatity: Publishing house of the Kola Scientific Center of the RAS, 2010. 144 p. (in Russian).

Kovalev S.G., Vysotsky I.V. A new type of noble metal mineralization in the terrigenous rocks of Shatak graben, western slope of the Southern Urals // Lithology and Mineral Resources. 2006. V. 41, No. 4. P. 371–377. doi.org/10.1134/S0024490206040079.

Kovalev S.G., Vysotsky I.V. New data on geology of the Shatak Complex (western slope of the Southern Urals) // Lithology and Mineral Resources. 2008. V. 43, No. 3. P. 250–259. doi.org/10.1134/S0024490208030048.

Kovalev S.G., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Izotopno-geokhimicheskoe (Rb–Sr, Sm–Nd) izuchenie magmaticheskikh porod Shatakskogo kompleksa (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 sopredelnykh territorii [Geology, minerals and problems of geoecology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories]. Spb: Svoe publ., 2018. P. 256–262 (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 // Doklady Earth Sciences. 2017. V. 475, No. 1. P. 743–747. doi.org/10.1134/S1028334X17070169.

Kovalev S.G., Puchkov V.N., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Finds of “Ancient” Zircons in Magmatic Rocks of the Shatak Complex (Southern Urals) // Doklady Earth Sciences. 2018. V. 482. No. 2. P. 1270–1274. doi.org/10.1134/s1028334x18100124.

Krasnobaev A.A. Tsirkon kak indikator geologicheskikh protsessov [Zircon as an indicator of geological processes]. M.: Nauka publ., 1986. 152 p. (in Russian).

Kuznetsov N.B., Maslov A.V., Belousova E.A., Romanuk T.V., Krupenin M.T., Gorohanin V.M., Gorozhanina E.N., Seryogina E.S., Tselmovich V.A. The first U-PB (LA-ICP-MS) isotope data of detrital zircons from the basal levels of the Riphean stratotype // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 451, No. 1. P. 724–728. doi.org/10.1134/S1028334X1307026X.

Nosyrev I.V., Robul V.M., Orsa V.I. Generatsionnyi analiz aktsessornogo tsirkona [Generation analysis of accessory zircon]. M.: Nauka publ., 1989. 203 p. (in Russian).

Parnachev V.P., Rotar A.F., Rotar Z.M. Srednerifeiskaya vulkanogenno-osadochnaya assotsiatsiya Bashkirskogo megantiklinoriya (Yuzhnyi Ural) [The Middle Riphean volcanogenic-sedimentary association of the Bashkir meganticlinorium (South Ural)]. Sverdlovsk: USC, USSR Academy of Sciences, 1986. 105 p. (in Russian).

Puchkov V.N. Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Urals (current issues of stratigraphy, tectonic, geodynamics and metallogeny)]. Ufa: DesignPoligraphService, 2010. 280 p. (in Russian).

Puchkov V.N., Kovalev S.G. Plyumovye sobytiya na Urале i ikh svyaz' s subglobal'nymi epokhami riftogeneza [Plume events in the Urals and their connection with subglobal eras of rifting] // *Kontinentalnyi riftogenez, soputstvuiushchie protsessy* [Continental rifting, related processes]. Irkutsk: IZK SB RAS, 2013. P. 34–38 (in Russian).

Puchkov V.N., Kozlov V.I., Krasnobaev A.A. Paleozoiskie U-Pb SHRIMP-datirovki magmатических пород Bashkirskogo

megantiklinoriya [Paleozoic U-Pb SHRIMP-dating of igneous rocks of the Bashkir meganticlinorium] // *Geologicheskii sbornik 9* [Geological collection No. 9] / IG UC RAS. Ufa: DesignPoligraphService publ., 2011. P. 36–43 (in Russian).

Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Schmitz M., Kozlov V.I., Davydov V.I., Lepekhina E.N., Nekhorosheva A.G. Novye U-PB datirovki vulkanitov mashakskoi svity rifeya Yuzhnogo Urала i ikh sravnitel'naya otsenka [New U-PB datings of the Mashak Formation of the Riphean Southern Urals and their comparative assessment] // *Geologicheskii sbornik 8* [Geological collection No. 8] / IG UC RAS. Ufa: DesignPoligraphService, 2009. P. 3–14 (in Russian).

Pystina Yu.I., Pystin A.M. Tsirkonovaya letopis' Ural'skogo dokembriya [Zircon Chronicle of the Ural Precambrian]. Ekaterinburg: Urals Branch of the RAS, 2002. 167 p. (in Russian).

Pystina Yu.I., Pystin A.M. Raspreделение U i Th v tsirkonakh metamorficheskikh porod i granitoidov severa Urала [The distribution of U and Th in zircons of metamorphic rocks and granitoids of the north of the Urals] // *Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geologii Bashkortostana, Urала i sopredelnykh territorii* [Geology, minerals and problems of the geology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories]. SPb: Svoe publ., 2018. P. 294–299 (in Russian).

Ronkin Yu.L., Sinder S., Lepikhina O.P. Izotopnaya geologiya drevneishikh obrazovaniy Yuzhnogo Urала [Isotope Geology of the Oldest rocks of the Southern Urals] // *Lithosphere*. 2012. No. 5. P. 50–76 (in Russian).

Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism // *Chemical Geology*. 2002. V. 184. P. 123–138. doi.org/10.1016/s0009-2541(01)00355-2.

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