

~1380 МЛН ЛЕТ LIP ЮЖНОГО УРАЛА: ПРЕЦИЗИОННЫЕ U-Pb ID-TIMS ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ЦИРКОНУ ИЗ ГРАНИТОВ РАПАКИВИ

© 2016 г. Ю. Л. Ронкин, М. Тихомирова, А. В. Маслов

Появившаяся более 20 лет назад концепция “Large Igneous Provinces” (LIPs) [12], к которым относятся значительные объемы вулканических и интрузивных образований, в настоящее время получила достаточно широкое признание [9 и ссылки там]. Первое указание на наличие LIP с возрастом ~1380 млн лет (более $4.2 \cdot 10^4$ км³ вулканических пород) на Урале мы находим со ссылкой на [5] в работе [10]. Формирование этой LIP связано с “машакским рифтогенным событием” [5], практически синхронно с которым на западном склоне Южного Урала в Башкирском мегантиклинории имело место становление разнообразных магматических образований (Бердяушского плутона гранитов рапакиви и ассоциирующих пород, Главной дайки Бакальского рудного поля, Медведевского, Губенского, Кусинского и других массивов), локализованных среди осадочных пород бурзянской и юрматинской серий – типовых подразделений нижнего и среднего рифея Северной Евразии. Эти процессы, в соответствии с имеющимися представлениями, были достаточно быстротечными [9], в связи с чем разрешающая способность методов изотопной геологии, с помощью которых можно было бы понять временные соотношения указанных событий, имеет принципиальное значение. К сожалению, в настоящее время подавляющее количество U-Pb датировок в рассматриваемом регионе выполнено с помощью методов изучения циркона SHRIMP и LA ICP-MS, погрешности которых значительно больше, чем ID-TIMS, что часто приводит к появлению артефактов при интерпретации геохронологических данных [3]. Более того, нередки случаи, когда авторы, получив “сенсационные” U-Pb SHRIMP и LA ICP-MS возрасты, пребывают в уверенности, что ими решена “прямая” геохронологическая задача, то есть датирован конкретный геологический объект. Однако с появлением прецизионных U-Pb ID-TIMS датировок по циркону этого же объекта, отражающих более “тонкие” временные соотношения, SIMS данные уже рассматриваются в качестве основы для решения “обратной” геохронологической задачи. В этом случае U-Pb ID-TIMS возраст обычно считается “реперным”, а SHRIMP и LA ICP-MS результаты, отличающиеся от U-Pb ID-TIMS данных, ин-

терпретируются при прочих равных условиях исходя из концепций “омоложения” или “удревнения”, наличия унаследованного, ксеногенного материала и т. д., и т. п. [3].

В данной работе рассмотрены результаты прецизионного U-Pb ID-TIMS датирования циркона, выделенного из гранитов рапакиви Бердяушского плутона (рис. 1), прорывающего карбонатные породы саткинской свиты нижнего рифея. Полученный с погрешностью ± 2.9 млн лет (95% доверительный интервал) U-Pb ID-TIMS возраст 1379.6 млн лет (СКВО = 1.3) в сочетании с немногочисленными, также реперными, U-Pb ID-TIMS данными [6, 7, 10, 13], накладывает определенные ограничения на возраст и оценку длительности ранне-среднерифейского (~1380 млн лет) импульса формирования LIP Южного Урала.

Бердяушский плутон (БП) гранитов рапакиви (ГР) и ассоциирующих пород локализован на северо-востоке Башкирского мегантиклинория примерно в 30 км к западу от г. Златоуст. Плутон имеет площадь ~35 км² и характеризуется концентрически-зональным строением. Во внешней его зоне развиты граниты рапакиви и граносиениты, сменяющиеся к центру сиенодиоритами, бескварцевыми и кварцевыми сиенитами. В центральной части БП наряду с сиенитами распространены дайки и жильные тела щелочных и нефелиновых сиенитов. Кроме того, в пределах БП наблюдаются автолиты и ксенолиты габбро и габбро-диабазов.

История изучения БП, начинающаяся с классических работ академика А.Н. Заварицкого, насчитывает уже почти 80 лет; все эти годы интерес исследователей был сосредоточен в основном на трех проблемах. Во-первых, БП – это единственный достоверно установленный представитель габбро–гранит рапакиви–фойдитовой магматической ассоциации, в связи с чем выяснение генетической природы и последовательности формирования всего многообразия пород БП до сих пор является предметом оживленного обсуждения [1, 4 и др.]. Во-вторых, поскольку, как уже отмечалось выше, БП прорывает карбонатные породы саткинской свиты, входящей в состав типового подразделения нижнего рифея (бурзяния), то в сочетании с

* Университет Фрайберга, Германия

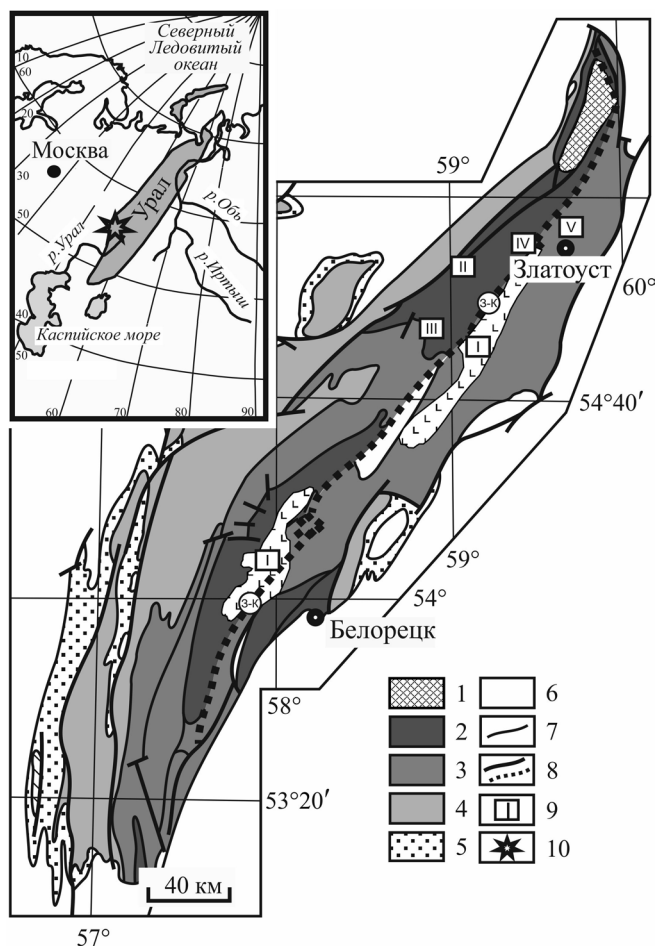


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Башкирского мегантиклинория и положение Бердяшского плутона и других магматических образований в его структуре.

1 – архейско-протерозойский тараташский метаморфический комплекс; 2 – нижний рифей; 3 – средний рифей; 4 – верхний рифей; 5 – венд; 6 – палеозойские отложения; 7 – магматические комплексы и осадочно-вулканогенные ассоциации, о которых идет речь в данной работе (I – машакская свита среднего рифея, II – Бердяшский плутон, III – Главная дайка Бакальского рудного поля, IV – Медведевский массив, V – Губенский массив); 8 – геологические границы; 9 – разрывные нарушения; 10 – Башкирский мегантиклинорий (на врезке). З-К – Зюраткульско-Каратаусский разлом.

датировками вулканитов машакской свиты основания среднерифейской юрматинской серии возраст его имеет принципиальное значение для установления возраста нижней границы среднего рифея [4]. И, в-третьих, роль БП, несомненно, велика и при оценке временной структуры проявившегося в пределах Южного Урала примерно на рубеже раннего и среднего рифея “машакского рифтогенного события”, магматические образования которого являются основной составляющей соответствующей LIP.

Имеющиеся изотопно-геохронологические данные по ГР, нефелиновым сиенитам и акцессорным

минералам из них все еще достаточно противоречивы. Например, авторы публикации [1] считают, что “Бердяшский плутон представляет собой проекцию на земную поверхность локальной области мантийного и корового магмообразования, которая эпизодически проявляла активность на протяжении почти миллиарда лет” (с. 59). Однако представленные далее результаты прецизионного U-Pb датирования циркона из гранита рапакиви БП масс-спектрометрическим (TIMS) методом изотопного разбавления (ID) ставят под сомнение указанный тезис.

Для датирования нами использованы выделенные из ГР (55°15'35" с.ш., 59°37'38" в.д.) относительно крупные (до 300 мкм) розового цвета кристаллы циркона, идиоморфизм которых меняется от отчетливо проявленного, до менее совершенного. Некоторые индивиды обладают ритмической зональностью. Центральные части отдельных кристаллов характеризуются различной интенсивностью катодолюминесценции, выявляющей как однородность их, так и относительную неоднородность (сложную блочность и/или мозаичное строение). Более подробные сведения об исследованных кристаллах приведены в [4].

U-Pb ID-TIMS датирование циркона осуществлено с использованием 205Pb-233U-235U EARTHTIME трассера [http://www.earth-time.org/spike_newsletter.pdf]. Перед кислотным разложением кристаллы были отожжены в муфельной печи при температуре ~850°C в течение 72 ч, после чего циркон был помещен в автоклавы (Savillex v = 3 мл) с целью химической абразии смесью HF + HNO₃ при 180°C в течение 12 ч. Затем препарат был обработан 3N HNO₃ и промыт несколько раз водой. Подготовленные таким образом единичные кристаллы загружены в 200 мкл сосуды Savillex, добавлен трассер, и разложение циркона проведено в армированных автоклавах Raag в среде HF при температуре 200°C в течение 48 ч. После этого раствор выпарили, подвергли воздействию 6N HCl при ~200°C (12 ч) и вновь высушили с добавлением 3N HCl. U и Pb были выделены с использованием модифицированной анионообменной одноколоночной (v = 50 мкл) хроматографии. Далее фракции U и Pb нанесли на “отожженные” Re ленты ионного источника (одноленточный режим) вместе с селикогелиевым активатором в соответствии с [11]. Измерение изотопного состава U и Pb смесей образца и трассера осуществлено с помощью термоионного масс-спектрометра Thermo Triton. Ионные токи Pb⁺ регистрировались с помощью SEM в динамическом режиме. Линейность характеристик умножителя контролировалась комбинацией измерений стандартов NBS 981, 982 и 983. Контроль фона и интерференций осуществлялся на массах 203.5, 204.5, 201 и 203 соответственно. Изотопный состав U определен путем измерения ионных токов UO₂⁺ на коллекторах Фарадея (резистор 1011 Ω), в статическом

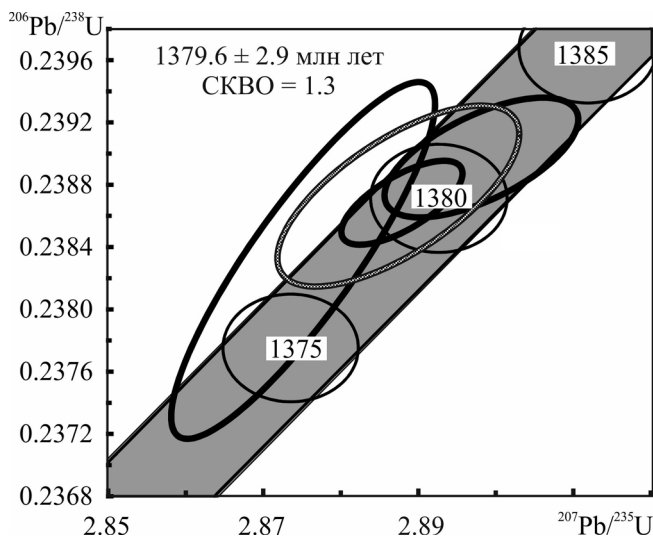


Рис. 2. График с конкордией для циркона из гранита рапакиви БП.

Затененная наклонная полоса – неопределенности констант распада ²³⁵U и ²³⁸U.

режиме. Изотопный состав кислорода контролировался измерением интенсивности на 272 а.е.м. [15]. Интенсивность фона измерялась ±0.5 а.е.м. по шкале наблюдаемого диапазона масс, в течение 30 с после регистрации каждых 50 отношений. Измеренные отношения U корректировали, используя алгоритмы, описанные в [8, 14].

Результаты прецизионного U-Pb ID-TIMS датирования циркона из гранита рапакиви БП представлены в табл. 1 и на графике с конкордией (рис. 2). Примечательным является наличие погрешностей, ±2σ величина которых практически не превышает неопределенность значений констант распада радиогенных изотопов урана. Для сравнения U-Pb ID-TIMS данных (настоящая работа) с ранее полученными U-Pb SHRIMP-II результатами [1, 4] на рис. 3 представлены графики с конкордией (в одном и том же масштабе) для циркона, выделенного из одной и той же пробы. Это дает отчетливое представление о том, насколько выше точность U-Pb ID-TIMS датирования относительно U-Pb SHRIMP-II данных, что при прочих равных условиях существенно повышает достоверность последующих интерпретаций [3].

Полученный U-Pb ID-TIMS возраст циркона из ГР 1379.6 ± 2.9 млн лет (95% доверительный интервал) в пределах аналитических погрешностей совпадает с опубликованными ранее, также U-Pb ID-TIMS датировками акцессорных минералов из магматических пород Башкирского мегантиклинория: циркона мафических микрогранулярных инклавов БП (1382±3 млн лет, [7]); циркона нефелиновых сиенитов БП (1368.4 ± 6.2 млн лет, [6]); бадделеита Главной дайки Бакальского рудного поля (1385.3 ±

Таблица 1. U-Pb ID-TIMS данные для циркона из гранита рапакиви БП

Образец	Композиционные параметры				Радиогенные изотопные отношения						Возраст, млн лет									
	Вес, мг	U, г/г	Pb, г/г	Pb*, Pb _c / Pb _c (шт)	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±2σ, %		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±2σ, %		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±2σ, %		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±2σ (д)		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±2σ (д)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±2σ (д)					
					(а)	(б)	(в)	(г)	(в)	(г)	(б)	(г)	(в)	(г)	(д)	(г)	(д)	(г)		
GR-1	0.002	705.6	189.1	26.68	13.66	1557.6	0.172	0.08750	0.24	2.87515	0.48	0.23831	0.40	0.877	1371.5	4.5	1375.4	3.6	1377.9	4.9
GR-2	0.002	344.7	99.5	18.41	10.25	1023.1	0.242	0.08796	0.29	2.89815	0.35	0.23897	0.13	0.635	1381.6	5.5	1381.4	2.7	1381.3	1.6
GR-4	0.002	856.3	228.1	28.66	15.38	1680.9	0.166	0.08775	0.17	2.88790	0.22	0.23868	0.092	0.695	1377.0	3.3	1378.8	1.7	1379.8	1.1

Примечание. (а) Pb* и Pb_c – свинцы радиогенного и нерадиогенного происхождения соответственно. (б) Изотопные отношения, скорректированные на индикатор и фракционирование с учетом анализа стандартов NBS-981 и NBS-982. (в) Скорректировано на индикатор и общий свинец. (г) Погрешности, вычисленные с использованием алгоритма, приведенного в [14]. (д) Рассчитано с помощью Isoplot/EX ver. 3.66. Параметры U-Pb изотопной системы: λ(²³⁵U) = 9.8485 · 10⁻¹⁰ год⁻¹; λ(²³⁸U) = 1.55125 · 10⁻¹⁰ год⁻¹.

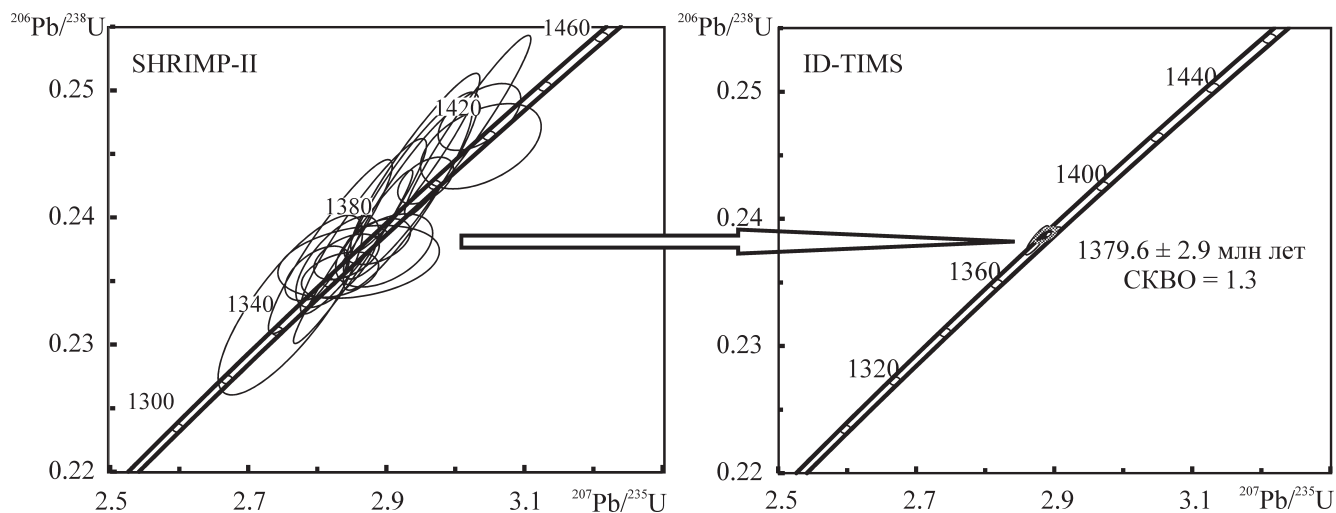


Рис. 3. U-Pb данные для циркона из одного и того же образца серого гранита рапакиви БП.

График слева – SHRIMP-II, аналитические погрешности по осям координат $\pm 1\sigma$, фигуративные эллипсы кратеров локализируются вдоль конкордии с определенным размахом [4]. Правый график – ID-TIMS, аналитические погрешности по осям координат $\pm 2\sigma$. Фигуративные эллипсы 3 кристаллов аппроксимируются конкордантным кластером (СКВО = 1.3) с возрастом 1379.6 ± 2.9 млн лет. Масштаб представления U-Pb данных на графиках с конкордией одинаков.

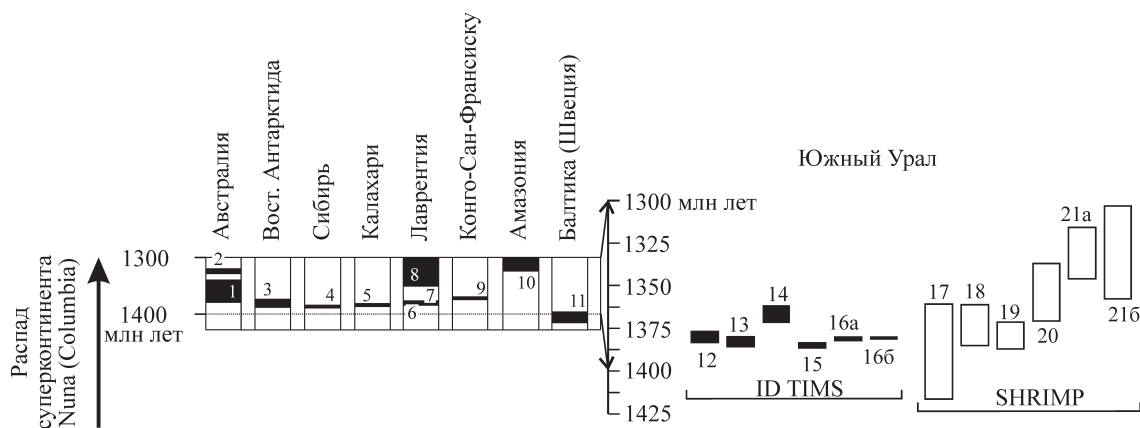


Рис. 4. Временная структура ~1380 млн лет LIP, по [9] с упрощениями и детализацией для Южного Урала.

1 – вулканы Morawa; 2 – силлы и дайки Derim-Derim; 3 – дайки Vestfold Hills; 4 – дайки Chieress; 5 – дайки и связанными с ними щелочные и карбонатитовые комплексы Pilanesberg; 6 – вулканы, дайки и силлы Midsommerso-Zig-Zag Dal; 7 – силлы и вулканы Hart River и Salmon River Arch; 8 – Nain Plutonic Suite; 9 – пластовые интрузии, дайки и силлы Kuppene-Zebra River; 10 – дайки Serrodo-Cachimbo; 11 – дайки Ахамо; 12–16 – U-Pb ID-TIMS возрасты аксессуарных минералов (12 – циркона ГР, 13 – циркона мафических микрогранулярных инклавов БП, 14 – циркона нефелиновых сиенитов БП, 15 – бадделеита Главной дайки Бакальского рудного поля, 16a и 16b – циркона риолитов машакской свиты); 17–21 – результаты U-Pb SHRIMP-II датирования циркона (17 – из габбро БП, 18 – из кварцевых сиенит-порфиров БП, 19 – из анортозитов Медведевского массива, 20 – из гранит-порфиров того же массива, 21a и 21b – из Губенского массива).

± 1.4 млн лет, [10]); циркона риолитов машакской свиты (1381.1 ± 0.7 и 1380.2 ± 0.5 млн лет, [13]).

Перечисленным выше U-Pb ID-TIMS реперным данным также удовлетворяют многочисленные, характеризующиеся в силу специфики анализа [3] значительно большим размахом погрешностей (см. рис. 3), результаты U-Pb SHRIMP-II датирования циркона из: габбро БП 1388 ± 28 млн лет; кварцевых сиенит-порфиров БП 1372 ± 12 млн лет; анортозитов и гранит-порфиров Медведевского массива 1379 ± 8 млн лет, 1353 ± 16 млн лет соответственно. При-

мерно соизмеримые или большие погрешности [3] свойственны U-Pb LA ICP-MS результатам датирования циркона из гранитоидов Губенского массива¹ – 1330 ± 16 и 1330 ± 27 млн лет. Все эти датировки сви-

¹ Медведевский и Губенский массивы являются звеньями цепочки (вытянутой на 70 км вдоль простирания Зюраткульского разлома) расчлененных габбро-гранитных интрузий кусинско-копанского комплекса, также локализованных среди отложений нижнего и среднего рифа на северо-востоке Башкирского мегантиклинория.

детельствуют о совершенно определенных временных рамках “машакского рифтогенного события”, длительность которого, с учетом полученной нами и имеющихся прецизионных U-Pb ID-TIMS данных, составляет не более 10 млн лет.

Анализ данных по LIPs мира показал [9], что таковые с возрастом 1410–1360 млн лет известны на западе Канады и северо-западе США (силлы и вулканы Hart River и Salmon River Arch, датировки – 1380 ± 4 , 1386 ± 2 , $1383+6/-5$ и 1379 ± 1 млн лет), севере Гренландии (вулканы, силлы и дайки Midsommerso и Zig-Zag Dal, 1382 ± 2 млн лет), в Антарктиде (дайки Vestfold Hills, 1380 ± 7 млн лет), Анголе, Намибии, Танзании (пластовые интрузии, дайки, вулканы и силлы Kunene-Zebra River, Pilanesberg и др., 1371 ± 2.5 , 1374 ± 10 , 1385 ± 5 и 1381 ± 10 млн лет) и ряде других регионов. К этому же интервалу принадлежат дайки Ахамто в Швеции (1410 ± 10 млн лет) (рис. 4). Считается, что “машакское рифтогенное событие” и событие Zig-Zag Dal–Midsommerso в северной Гренландии маркируют общую зону растяжения и были частью событий, связанных с распадом позднепалеопротерозойского суперконтинента Nuna (Columbia) [9]. Приведенные в настоящей работе новые изотопно-геохронологические данные в совокупности с результатами исследования РЗЭ- и Lu-Hf-систематики циркона ГР Бердяшского плутона [2] в существенной степени подтверждают этот вывод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснобаев А.А., Попов В.С., Беляцкий Б.В. Хронологические и генетические соотношения интрузивных пород Бердяшского плутона (Южный Урал) в свете новых U-Pb и Sm-Nd изотопных данных // Зап. РМО. 2011. Ч. СХХХ, вып. 2. С. 59–74.
2. Ронкин Ю.Л., Гердес А., Маслов А.В. РЗЭ- и Lu-Hf-систематика циркона гранитов рапакиви и ассоциирующих пород суперконтинента Нуна (Колумбия) // Докл. АН. 2015. Т. 461, № 2. С. 214–219.
3. Ронкин Ю.Л., Ефимов А.А., Лепихина О.П. Артефакты при U-Pb SIMS датировании цирконов. Арбитражное сравнение с прецизионными U-Pb ID-TIMS и данными иных изотопных систем // Ежегодник-2008. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 156. 2009. С. 337–343.
4. Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Казак А.П., Матуков Д.И., Лепихина О.П. Граница нижнего и среднего рифея на Южном Урале: новые изотопные U-Pb SHRIMP-II ограничения // Докл. АН. 2007. Т. 415, № 3. С. 370–378.
5. Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Матуков Д.И., Лепихина О.П., Попова О.Ю. “Машакское рифтогенное событие” рифея типовой области (Южный Урал): новые изотопно-геохронологические рамки // Стрoение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере: мат-лы IX междунар. науч. конф. Сыктывкар: Геопринт, 2005. С. 305–307.
6. Сандерн С., Ронкин Ю.Л., Крамм У., Маслов А.В., Лепихина О.П. U-Pb датирование единичных кристаллов циркона с применением трассера $^{205}\text{Pb}/^{233}\text{U}$: на примере нефелиновых сиенитов Бердяшского массива, Южный Урал // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза: мат-лы II Рос. конф. по геохронологии. СПб.: ИГГД РАН, 2003. С. 461–465.
7. Belyaev A.M., Neymark L.A., Shebanov A.D., Larin A.M. Age and origin of mafic xenoliths from rapakivi granites of the Berdiaush massif (S. Urals, Russia) // Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale (Abstr. V. IGCP-315 Symp.), Helsinki, 1996. P. 6.
8. Crowley J.L., Schoene B., Bowring S.A. U-Pb dating of zircon in the Bishop Tuff at the millennial scale // Geology. 2007. V. 35. P. 1123–1126.
9. Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 653 p.
10. Ernst R.E., Pease V., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N.D., Hamilton M. Geochemical characterization of Precambrian magmatic suites of the southeastern margin of the East European Craton, Southern Urals, Russia // Геологический сборник № 5. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. С. 119–161.
11. Gerstenberger H., Haase G. A highly effective emitter substance for mass spectrometric Pb isotope ratio determinations // Chem. Geol. 1997. V. 136. P. 309–312.
12. Large Igneous Provinces. JOI/USSAC Workshop Report. / Eds M.F. Coffin, O. Eldholm. The University of Texas at Austin. Institute for Geophysics. 1991. 79 p.
13. Puchkov V., Krasnobaev A., Sergeeva N. The New Data on Stratigraphy of the Riphean Stratotype in the Southern Urals, Russia // J. Geoscience and Environment Protection. 2014. V. 2. P. 108–116.
14. Schmitz M.D., Schoene B. Derivation of isotope ratios, errors, and error correlations for U-Pb geochronology using ^{205}Pb - ^{235}U -(^{233}U)-spike isotope dilution thermal ionization mass spectrometric data // Geochemistry. Geophysics. Geosystems. 2007. V. 8. P. 1–20.
15. Wasserburg G.J., Jacobsen S.B., DePaolo D.J., McCulloch M.T., Wen T. Precise Determination of Sm/Nd Ratios, Sm and Nd Isotopic Abundances in Standard Solutions // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1981. V. 45. P. 2311–2323.