

ЦИРКОН ГРАНИТОВ РАПАКИВИ И АССОЦИИРУЮЩИХ ПОРОД ЮЖНОГО УРАЛА: REE И Lu–Hf ИЗОТОПНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

© 2015 г. Ю. Л. Ронкин, А. Гердес*, Р. Несбит**

В настоящей работе обсуждаются первые сведения о REE и Lu–Hf-систематиках циркона гранитов рапакиви и ассоциирующих пород бердяшского Южного Урала, представленных известным Бердяшским массивом (БМ) в сравнении с некоторыми мировыми аналогами. Показана практическая идентичность Lu–Hf изотопного возраста (~1383 млн лет) гранитов рапакиви, кварцевых сиенитодиоритов и нефелиновых сиенитов БМ. Установлено, что все упомянутые образования, внедрившиеся примерно на границе раннего и среднего рифея, обладают значениями изотопных составов Hf и Lu–Hf модельных возрастов, указывающими на коровые источники возрастом 2013–2219 млн лет, тогда как ассоциирующие с ними габбро имеют четкие доказательства происхождения из вещества с Lu–Hf модельными возрастными 1658–1685 млн лет при умеренно деплетированных значениях $\epsilon_{\text{Hf}}(1383)$ ($(4.1 \pm 0.7) \dots (4.9 \pm 0.6)$). Показано, что особенности распределения РЗЭ (Σ РЗЭ, Eu/Eu*, Ce/Ce*, Pr/Pr*, La/Lu) и Lu–Hf изотопная систематика циркона, могут быть успешно использованы для реконструкции возрастной и генетической идентификации гранитов рапакиви и ассоциирующих пород.

Бердяшский массив гранитов рапакиви и ассоциирующих с ними пород расположен на западном склоне Южного Урала примерно в 30 км к западу от г. Златоуст. Массив имеет площадь ~35 км² и характеризуется относительно выраженным центрически-зональным строением. Во внешней его зоне развиты граниты и граносиениты, сменяющиеся к центру сиенитодиоритами, бескварцевыми и кварцевыми сиенитами. В центральной части БМ наряду с сиенитами распространены щелочные и нефелиновые сиениты. Более подробные сведения о геологическом строении БМ можно найти в многочисленной литературе, приведенной в работе [5].

Первые представления о вероятном мантийном источнике для БМ были высказаны на основании Rb–Sr-изотопных характеристик габбро, кварцевых и нефелиновых сиенитов, а также гранитов, удовлетворяющих линии регрессии (в координатах $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) с относительно низким $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7034 \pm 0.007$ [1]. Однако дальнейшее изучение изотопии кислорода [3], Pb [2], Sm–Nd [4]

в породах БМ поставило под сомнение существование “единого” мантийного источника гранитов рапакиви и ассоциирующих пород.

В рамках настоящей работы исследованы REE- и Lu–Hf-систематика циркона, выделенного из представительных образцов габбро, гранитов рапакиви, кварцевых сиенитодиоритов и нефелиновых сиенитов БМ. Минералогические особенности циркона даны в [6]. Определение изотопного состава Lu и Hf в цирконе ($n = 21$) выполнено по тем же локальным областям, по которым ранее проведено их U–Pb SHRIMP-II датирование [6], посредством масс-спектрометра Thermo Scientific Neptune ICP-MS, интегрированного с лазером New Wave Research UP-213. Детали методики описаны в [14]. Сведения о содержаниях REE в цирконе ($n = 18$) получены в отделении геологии океанографического центра Великобритании (Southampton, UK) с помощью масс-спектрометра FISIONS PQ2 PlasmaQuad, совмещенного с лазером Spectron UV (266 нм). Аналитические данные и их графическая интерпретация представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1–3.

Содержания La и Lu в цирконе из габбро и нефелинового сиенита варьируют от 0.043–1848 до 3.1–467 г/т соответственно (табл. 1). Минимальная концентрация Hf обнаружена в цирконе из габбро (2633 г/т), тогда как в одном из кристаллов из кварцевого сиенитодиорита этот параметр равен 18 293 г/т. Спектры распределения REE в цирконе из габбро, нормализованные по хондриту (см. рис. 1), демонстрируют значительное обогащение тяжелыми REE, а также положительную Ce (11.4–62.4) и отрицательную Pr (0.08–0.044) аномалии. Для циркона гранитов рапакиви и кварцевых сиенитодиоритов наблюдается четко выраженный Eu-минимум (0.031–0.057, 0.035–0.068 соответственно). В то же время для кристаллов из габбро и нефелиновых сиенитов Eu-аномалия практически отсутствует. Нормированные по хондриту спектры REE в цирконе из нефелиновых сиенитов демонстрируют значительное обогащение легкими REE ($\text{La}/\text{Lu} = 2.1$ –6), аналогичная картина наблюдается и для некоторых кристаллов из гранитов рапакиви.

Lu–Hf-систематика (см. табл. 2, рис. 2) для циркона из гранитов рапакиви характеризуется

* Институт наук о Земле, отделение минералогии, петрологии и геохимии, университета И.В. Гёте.

** Отделение геологии океанографического центра Великобритании (г. Саутамптон).

Таблица 1. REE-данные для циркона из гранитов рапакиви и ассоциирующих пород БМ (г/г)

Элемент	Габро					Граниты-рапакиви			Кварцевые сиенодиориты					Неф. сиениты				
	7.3A	7.3B	7.3C	14A	14B	15A	15B	15C	14A	14B	14C	14D	14A	14B	14C	14A	14B	14C
La	0.0058	0.0043	0.0063	0.04	0.0064	0.036	0.09	0.046	0.45	9.8	2.4	300	0.61	5.7	5.9	960	1800	1100
Ce	1.1	1.1	0.81	2.4	2.6	4.6	2.6	2.1	11	24	14	300	47	41	48	2800	2500	1700
Pr	0.0033	0.012	0.0067	0.014	0.058	0.002	0.019	0.044	0.34	1.8	0.88	56	0.88	2.4	2.1	160	220	120
Nd	0.15	0.23	0.12	0.33	0.95	0.5	0.77	0.48	2.9	10	5.9	220	13	14	14	660	780	430
Sm	0.25	0.3	0.16	0.56	2	0.44	0.94	0.55	6.3	8.3	5.7	34	23	19	13	290	180	150
Eu	0.15	0.19	0.083	0.26	0.79	0.4	0.36	0.36	0.25	0.19	0.12	0.4	1.0	0.64	0.32	91	54	54
Gd	1.3	1.4	0.81	3.2	8.3	4.8	3.4	3.5	29	30	24	33	95	73	60	710	300	370
Tb	0.45	0.48	0.31	1.1	2.6	1.6	1.2	1.3	11	11	8.9	59	32	26	22	230	90	130
Dy	5.1	5.2	3.5	13	28	19	14	14	130	130	110	52	330	300	260	2400	960	1500
Ho	1.8	1.9	1.3	4.7	9.3	6.3	4.7	5.2	52	46	38	16	110	110	94	770	350	510
Er	9.2	8.9	6.4	23	44	32	22	26	250	220	190	71	520	560	460	3400	1700	2300
Tm	2.0	1.9	1.5	4.9	8.7	7.3	4.6	5.3	48	40	37	13	94	110	89	580	320	430
Yb	20	19	15	45	76	69	43	46	390	310	300	100	690	860	680	3600	2100	2800
Lu	4.2	3.8	3.1	11	19	16	11	11	91	66	66	22	150	190	150	470	310	380
Hf	3400	2600	2900	8100	8600	13000	8200	8700	12000	9300	6800	3200	11000	15000	18000	6700	6600	8500
U	85	66	66	160	200	340	170	120	410	370	500	140	530	820	800	8800	4900	8300
ΣREE	46	44	33	110	200	160	110	120	1000	900	800	1200	2100	2300	1900	17000	12000	12000
Eu/Eu*	0.82	0.89	0.71	0.61	0.6	0.83	0.62	0.79	0.057	0.036	0.031	0.035	0.068	0.052	0.035	0.61	0.71	0.69
Ce/Ce*	62	36	30	25	33	130	16	11	6.6	1.4	2.3	0.57	15	2.7	3.4	1.8	0.95	1.1
Pr/Pr*	0.008	0.024	0.022	0.016	0.036	0.0013	0.013	0.044	0.061	0.12	0.097	0.22	0.035	0.099	0.078	0.11	0.16	0.14
La/Lu	0.0014	0.0011	0.002	0.0036	0.00034	0.0022	0.0086	0.004	0.005	0.15	0.037	13	0.0041	0.031	0.038	2.1	6.0	2.9

Примечание. Eu/Eu* = $Eu_N / (Sm_N \cdot Gd_N)^{0.5}$, Ce/Ce* = $Ce_N / (Ln_N \cdot Pr_N)^{0.5}$, Pr/Pr* = $Pr_N / (Ce_N \cdot Nd_N)^{0.5}$.

Таблица 2. La-MS-ICPMS Lu-Hf-данные для циркона из гранитов рапакиви и ассоциирующих пород БМ

Образец	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}^a$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}^a$	$\pm 2\sigma$	$^{178}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{180}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	Sig_{HF}^b , вольт	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(0)}^c$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)^c$	$\pm 2\sigma$	T_{DM}^d , млн лет
1	0.0103	0.0008	0.00035	0.00002	1.46716	1.88692	9	0.282034	0.000021	0.282025	4.1	0.7	1685
2	0.0171	0.0014	0.00058	0.00004	1.46719	1.88675	17	0.282061	0.000016	0.282045	4.9	0.6	1658
3	0.0068	0.0006	0.00023	0.00001	1.46719	1.88686	17	0.282044	0.000022	0.282038	4.6	0.8	1666
Габбро													
21	0.0209	0.0024	0.00066	0.00007	1.46721	1.88673	17	0.281753	0.000018	0.281736	-6.1	0.6	2084
22	0.0706	0.0059	0.00211	0.00014	1.46720	1.88664	13	0.281860	0.000023	0.281806	-3.6	0.8	2013
23	0.0339	0.0027	0.00104	0.00006	1.46714	1.88670	15	0.281756	0.000017	0.281729	-6.4	0.6	2100
24	0.0997	0.0082	0.00335	0.00022	1.46718	1.88672	28	0.281817	0.000018	0.281730	-6.3	0.6	2146
25	0.0466	0.0038	0.00138	0.00008	1.46716	1.88666	13	0.281773	0.000017	0.281737	-6.1	0.6	2095
26	0.0233	0.0019	0.00074	0.00005	1.46719	1.88670	17	0.281748	0.000016	0.281728	-6.4	0.6	2095
Нефилиновые сиениты													
27	0.0270	0.0027	0.00089	0.00008	1.46717	1.88658	8	0.281753	0.000024	0.281730	-6.3	0.9	2096
28	0.0784	0.0075	0.00243	0.00020	1.46717	1.88653	6	0.281817	0.000021	0.281753	-5.5	0.7	2092
29	0.0338	0.0031	0.00107	0.00008	1.46715	1.88657	11	0.281779	0.000023	0.281751	-5.6	0.8	2070
30	0.0514	0.0062	0.00159	0.00018	1.46711	1.88661	7	0.281797	0.000021	0.281755	-5.4	0.7	2074
31	0.0526	0.0050	0.00161	0.00013	1.46716	1.88671	11	0.281830	0.000027	0.281788	-4.3	0.9	2028
32	0.0586	0.0049	0.00172	0.00011	1.46711	1.88663	8	0.281829	0.000027	0.281784	-4.4	1.0	2036
Кварцевые сиенитоидориты													
33	0.0362	0.0035	0.00113	0.00009	1.46715	1.88649	9	0.281741	0.000027	0.281711	-7.0	1.0	2126
34	0.0430	0.0041	0.00128	0.00010	1.46716	1.88664	6	0.281760	0.000027	0.281727	-6.4	0.9	2108
35	0.0457	0.0041	0.00142	0.00010	1.46712	1.88667	10	0.281776	0.000030	0.281739	-6.0	1.1	2093
36	0.0563	0.0047	0.00175	0.00011	1.46712	1.88664	12	0.281748	0.000026	0.281703	-7.3	0.9	2151
37	0.0424	0.0044	0.00136	0.00012	1.46710	1.88661	11	0.281691	0.000029	0.281655	-9.0	1.0	2208
38	0.0350	0.0030	0.00111	0.00007	1.46712	1.88661	9	0.281673	0.000025	0.281644	-9.4	0.9	2219
Стандарты													
91500 (n = 3)	0.0083	0.0013	0.00028	0.00003	1.46715	1.88674	8	0.282307	0.000015				
Temora (n = 5)	0.0423	0.0389	0.00139	0.00114	1.46715	1.88658	11	0.282698	0.000023				
Plesovice (n = 12)	0.0054	0.0028	0.00013	0.00007	1.46723	1.88668	14	0.282471	0.000029				
GJ-1 (n = 12)	0.0074	0.0006	0.00026	0.00001	1.46720	1.88672	10	0.282015	0.000024				
JMC 475 (n = 8)					1.46719	1.88669	11	0.282149	0.000008				

Примечание. $t = 1383$ млн лет. Величина погрешности $\text{Lu}/\text{Hf} < 6\%$ оценивалась по результатам измерений параметров стандартов циркона GJ-1 и Plesovice.
 a $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf} = (^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb})_{\text{true}} / (^{173}\text{Yb}/^{177}\text{Hf})_{\text{measured}} \cdot (M_{173\text{Yb}}/M_{177\text{Hf}})^{0.010}$, $\beta(\text{Hf}) = \ln((^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{true}} / (^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{measured}}) / \ln(M_{179\text{Hf}}/M_{177\text{Hf}})$, где "true" и "measured" – истинные и измеренные значения соответственно. M – массовые числа соответствующих изотопов. $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ вычислены с использованием отношения $^{175}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$.
 b Средняя интенсивность сигнала Hf.
 c Значения $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(0)}$ и $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = \left[\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{measured}}}{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{CHUR}}} - 1 \right] \cdot 10^4$ вычислены с использованием $^{206}\text{Rb}/^{238}\text{U}$ SHRIMP-II возраста и параметров CHUR: $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0336$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282785$.
 d Значения Lu-Hf модельного возраста вычислены с использованием параметров DM: $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$.

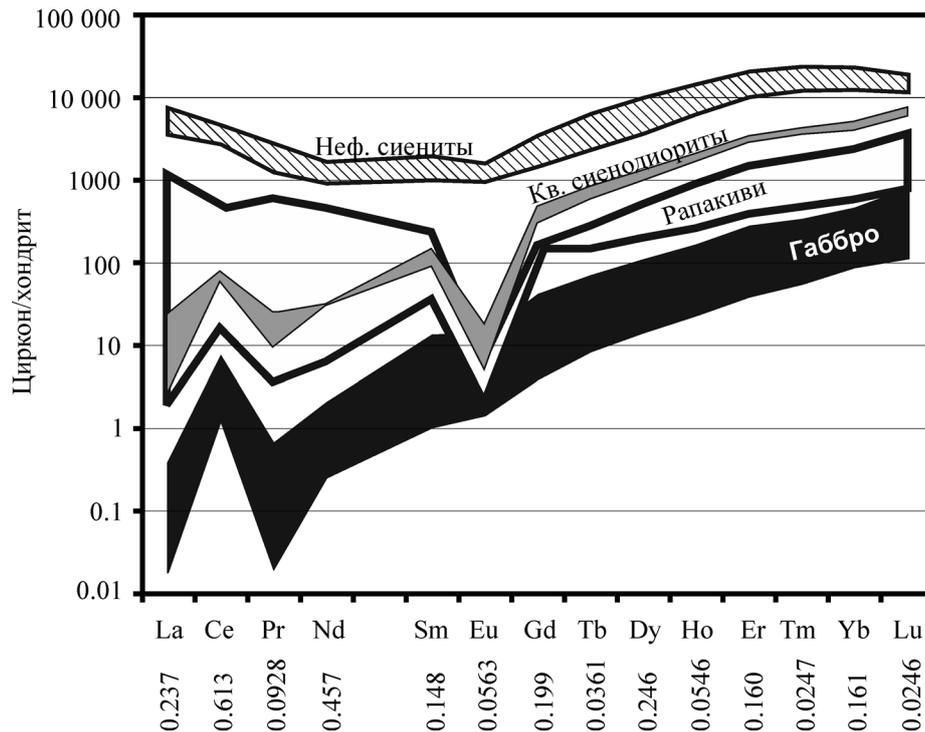


Рис. 1. REE нормализованная по хондриту систематика циркона гранитов рапакиви и ассоциирующих пород Южного Урала.

Под элементами указаны коэффициенты, по которым осуществлялась нормализация.

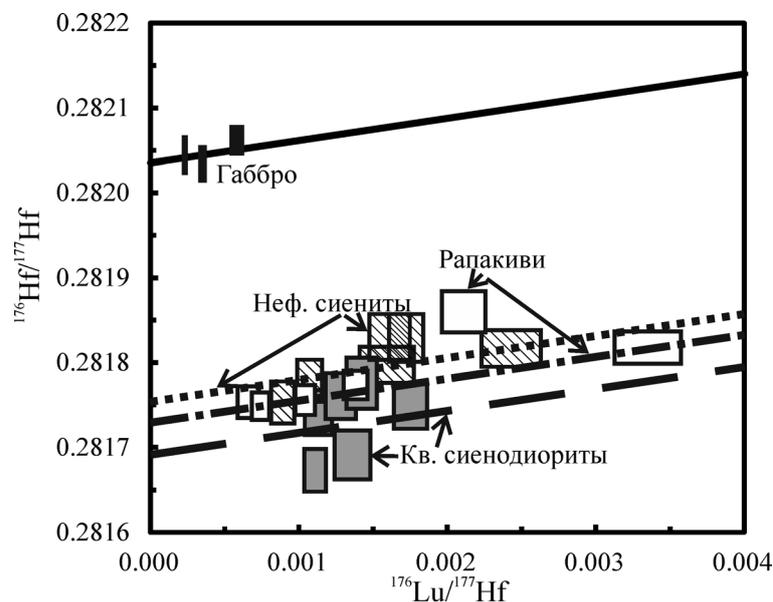


Рис. 2. Lu–Hf изотопная эволюционная диаграмма и соответствующие линии согласования с возрастом 1383 млн лет для циркона из гранитов рапакиви ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i = 0.281732$), габбро ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i = 0.282038$), нефелиновых сиенитов ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i = 0.281758$) и кварцевых сиенодиоритов ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i = 0.281695$) Бердяушского массива.

заметным разбросом $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (0.00066–0.00335), тогда как диапазон изменений этого параметра для габбро значительно меньше (0.00023–0.00058).

На графике $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ – $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ фигуративные точки циркона из габбро удовлетворяют линии согласования с возрастом 1383 млн лет и

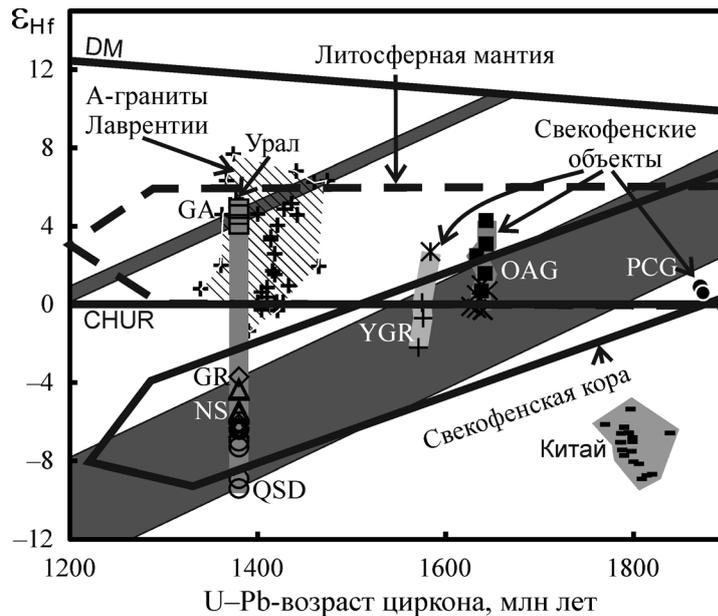


Рис. 3. Эволюция изотопов Hf в координатах “возраст– ϵ_{Hf} ” для циркона гранитов рапакиви (GR), габбро (GA), нефелиновых сиенитов (NS), кварцевых сиенодиоритов (QSD) Южного Урала в сравнении с фенноскандскими аналогами (YAG-younger age group: рапакиви и лейкогаббро-нориты, OAG-older age group: рапакиви и мафические породы, PCG-посткинематические граниты, [13]) и А-гранитами (Penokean, Mojave, Yavapai и Granite–Rhyolite) Лаврентии [14].

Данные для фигуративных точек области “Китай” из [14]. DM – деплетированная мантия, CHUR – хондритовый модельный резервуар. Верхняя (узкая) и нижняя (широкая) наклонные полосы отображают поля линий эволюции изотопов гафния для циркона габбро (GA), гранитов рапакиви (GR), кварцевых сиенодиоритов (QSD) и нефелиновых сиенитов (NS) соответственно (см. табл. 2).

$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t) = 0.282036 \pm 0.000011$ (см. рис. 2). Аналогичному возрасту отвечают линии согласования для Lu–Hf-данных циркона гранитов рапакиви, нефелиновых сиенитов и кварцевых сиенодиоритов, однако они значительно отличаются от габбро по величине $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(1383)$ (0.281744 ± 0.000030 , 0.281761 ± 0.000022 и 0.281697 ± 0.000038 соответственно).

Наиболее “древним” средним Lu–Hf-модельным возрастом (2219 млн лет) характеризуется циркон кварцевых сиенодиоритов. Минимальное значение этого параметра (1670 ± 14 млн лет) присуще циркону габбро. Циркон гранитов рапакиви и нефелиновых сиенитов имеет значения 2089 ± 68 и 2066 ± 12 млн лет, что сопоставимо (в пределах полученных погрешностей) с цирконом кварцевых сиенодиоритов.

Рассмотрение Lu–Hf-данных на графике в координатах “U–Pb возраст– $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ” (см. рис. 3) выявляет принадлежность значений $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ циркона габбро трендам эволюции умеренно истощенной мантии, среднее значение $\epsilon_{\text{Hf}}^m(1383) = +4.6 \pm 1.0$, СКВО = 1.5. Иными словами, циркон из габбро демонстрирует первичные отношения $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ вещества, произошедшего из источников обедненных Hf и имеющих отношения Lu/Hf, значительно большие, нежели хондриты. Фигуративные точки циркона грани-

тов рапакиви, нефелиновых сиенитов и кварцевых сиенодиоритов БМ, напротив, располагаются ниже линии эволюции изотопов Hf хондритового резервуара CHUR, $\epsilon_{\text{Hf}}^m(1383) = -5.99 \pm 0.93$, -5.32 ± 0.71 , -7.6 ± 1.4 соответственно, что свидетельствует о значительном вкладе в их состав (в сравнении с габбро) корового материала.

Lu–Hf-возраст циркона габбро, гранитов рапакиви, нефелиновых сиенитов и кварцевых сиенодиоритов БМ совпадает, в пределах наблюдаемых погрешностей, с опубликованными нами ранее U–Pb-датировками циркона габбро (SHRIMP-II 1388 ± 28 млн лет), нефелиновых сиенитов (ID-TIMS 1368.4 ± 6.2 и SHRIMP-II 1373 ± 21 млн лет), кварцевых сиенит-порфиров (SHRIMP-II 1372 ± 12 млн лет [7]). Приведенные выше материалы вместе с данными о возрасте габбро-норитов, гранито-гнейсов и гранитов кусинско-копанского комплекса (Кусинский массив, 1388 ± 63 млн лет, Sm–Nd-метод [9]; Копанский массив, 1385 ± 25 млн лет, Рябиновский массив, 1386 ± 34 млн лет, Губенский массив, 1330 ± 16 и 1330 ± 27 млн лет, все LA ICP-MS метод, Медведевский массив, 1379 ± 8 млн лет, U–Pb SHRIMP-II) [10], локализованного среди отложений нижнего и среднего рифея на северо-востоке Башкирского мегантиклинория, свидетельствуют о более масштабном характере и более сложной, чем

предполагалось ранее, временной структуре так называемого “машакского рифтогенного события” [6]. Длительность его, с учетом погрешностей современных изотопных датировок, может быть оценена примерно в 30–50 млн лет, что удовлетворительно согласуется с продолжительностью развития таких внутриконтинентальных структур, как позднекайнозойская рифтовая область Эфиопии или позднесреднерифейская рифтовая система Мидконтинента.

Lu–Hf модельные возрасты относительно деплетированной мантии DM (см. табл. 2), рассчитанные для циркона из габбро, согласуются с тем, что эти породы имели более “молодой” протолит ($T_{DM} = 1658–1685$ млн лет) в сравнении с гранитами рапакиви, кварцевыми сиенодиоритами и нефелиновыми сиенитами. У последних $T_{DM} = 2013–2219$ млн лет, что подтверждается и Sm–Nd модельными датировками для гранитов рапакиви ($T_{DM} = 1980–2493$ млн лет). Подобные особенности демонстрируют и Lu–Hf модельные возрасты А-гранитов трех провинций (Penokean, Mojave и Granite–Rhyolite) суперконтинента Лаврентии [15]. Это позволяет считать, что коровый источник со средним изотопным составом Hf был более развитым, тогда как аналогичные параметры, рассчитанные для гранитов провинций Yavapai и южной части Granite–Rhyolite, близки к возрасту их формирования [15]. Однако, в отличие от вывода о значительной роли корового компонента в образовании гранитов рапакиви БМ, считается, что А-граниты Лаврентии (возрастом около 1400 млн лет) формировались в основном за счет мантийного источника вследствие частичного плавления недеплетированной нижней коры. Иными словами, нагрев нижнего слоя коры в условиях растяжения приводил к выплавлению высокотемпературных гранитных расплавов при низкой фугитивности кислорода наряду с формированием расплавов анортозитового и другого состава. Считается, однако, что для разнообразных магматических ассоциаций Лаврентии эта модель имеет ограниченное применение [15] по крайней мере по двум причинам: 1) частичное плавление нижнекоровых образований не может дать большие объемы гранитного расплава; 2) из всех А-гранитов Лаврентии только граниты батолитов Wolf River и Sherman имеют редуцированные составы; остальные относятся к мета- или перглиноземистому типам, что может быть обусловлено плавлением значительного объема магнетитсодержащих и/или метаосадочных пород. Отсюда крайние геохимические и изотопные характеристики А-гранитов батолита Sherman объясняются магматической дифференциацией толеитовой магмы первичного мантийного резервуара [15 и др.].

Главный вывод, который следует из данных по изотопии Hf циркона, заключается в том, что граниты рапакиви, кварцевые сиенодиориты и нефели-

линовые сиениты БМ не могут являться продуктами преимущественно мантийных расплавов, поскольку диапазон экстраполированных значений $\epsilon_{Hf}(1383) = -3.7...-9.4$ укладывается в поле, локализованное существенно ниже линии CHUR. Наблюдаемая закономерность находится в хорошем соответствии и с данными Sm–Nd изотопной систематики гранитов рапакиви БМ, определяющей $\epsilon_{Nd}(t) ((-5.0 \pm 0.4)...(-7.3 \pm 0.3))$. Другим аргументом в пользу сказанного выше является различие спектров распределения REE в цирконах габбро и остальных пород БМ (см. рис. 1). Аналогичный вывод справедлив и для циркона гранитов рапакиви Yingfeng северного Китая [11] (см. рис. 3). Напротив, для циркона из габбро $\epsilon_{Hf}(1383) = 4.1–4.9$, что свидетельствует о происхождении их из вещества с Lu–Hf модельными возрастными 1658–1685 млн лет, имеющего умеренно деплетированные параметры (см. табл. 2, рис. 3).

Сравнение с другими А-гранитами суперконтинентов Лаврентия и Нуна (Колумбия) [15.16 и др.] позволяет выявить определенное сходство между гранитами А-типа Лаврентии и мезопротерозойскими гранитами рапакиви, распространенными, в частности, на Бразильском щите и в Фенноскандии (см. рис. 3). Ассоциация гранитов рапакиви с разновозрастными основными и ультраосновными магматическими и осадочными породами внутриконтинентальных рифтов свидетельствует о том, что их формирование было связано с распадом Лаврентии. В Финляндии А-граниты (1650–1540 млн лет), внедрившиеся на этапе Свеккофеннской орогении, относятся к классическому комплексу гранитов рапакиви. Эти породы имеют минералогические и геохимические особенности, характерные для внутриплитных обстановок, что свидетельствует о дегидрационном плавлении нижней коры промежуточного и кислого состава на начальной стадии рифтообразования или прерванном рифтогенезе уже консолидированной палеопротерозойской и архейской континентальной коры. Причина плавления до сих пор не ясна, но, как правило, процесс плавления связывают с магматическим андерплейтингом в результате подъема субконтинентальной мантии.

Таким образом, на основании настоящей работы, с учетом ранее выполненных нами исследований [2–7, 11–16 и др.] и современного состояния изученности [2–16], можно сделать следующие выводы. Lu–Hf изотопный возраст формирования гранитов рапакиви и ассоциирующихся пород БМ практически идентичен (~1383 млн лет) и совпадает с базальт-риолитовым LIP-вулканизмом Южного Урала, гранитным магматизмом в Лаврентии и дайкообразованием на Сибирском кратоне. Рифейские граниты рапакиви и ассоциирующие с ними кварцевые сиенодиориты и нефелиновые сиениты БМ характеризуются значениями изотопных составов Hf и Lu–Hf изотопных мо-

дельных возрастов, указывающими на формирование их преимущественно за счет коровых источников возрастом 2013–2219 млн лет. Ассоциирующие в БМ с гранитами рапакиви габбро имеют четкие доказательства происхождения из вещества с Lu–Hf модельными возрастными 1658–1685 млн лет, имеющего умеренно деплетированные параметры $\epsilon_{\text{Hf}}(1383) = (4.1 \pm 0.7) \dots (4.9 \pm 0.6)$.

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта УрО РАН 12-И-5-2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Степанов А.И., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. Петрология и рубидий-стронциевая геохронология Бердяушского массива рапакиви (Южный Урал) // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1981. № 1. С. 21–37.
2. Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Sindern S., Kramm U., Лепихина О.П. Pb–Pb изотопная систематика пород и “acid leached” полевых шпатов Бердяушского массива // Геология и металлогения ультрамафит-мафитовых и гранитоидных ассоциаций складчатых областей: мат-лы Междунар. науч. конф. Екатеринбург, 2004. С. 381–383.
3. Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. К проблеме происхождения текстуры рапакиви (на примере бердяушского массива, южный Урал): изотопы кислорода, Rb–Sr и Sm–Nd // Вулканизм и геодинамика: мат-лы II Всерос. симпоз. по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург, 2003. С. 410–411.
4. Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. Sm–Nd изотопная систематика гранитов рапакиви Южного Урала: на примере Бердяушского массива // Материалы III Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ИГЕМ РАН, 2006. Т. 2. С. 174–178.
5. Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Попова О.Ю. Основные геохимические характеристики гранитов рапакиви и ассоциирующих пород Бердяушского плутона. Тектономагматическая позиция и типология // Ежегодник-2004. Екатеринбург, 2005. С. 211–220.
6. 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. Т. 415, № 3. 2007. С. 370–378.
7. Ронкин Ю.Л., Матуков Д.И., Пресняков С.Л., Лепихина Е.Н., Лепихина О.П., Попова О.Ю. “in situ” U–Pb SHRIMP датирование цирконов нефелиновых сиенитов бердяушского массива (Южный Урал) // Литосфера. № 1. 2005. С. 135–142.
8. Холоднов В.В., Бочарникова Т.Д., Шагалов Е.С. Состав, возраст и генезис магнетит-ильменитовых руд среднерифейского стратифицированного Медведевского массива (кусинско-копанский комплекс Южного Урала) // Литосфера. 2012. № 5. С. 145–165.
9. Холоднов В.В., Ферштатер Г.Б., Ронкин Ю.Л., Бородина Н.С., Прибавкин С.В., Лепихина О.П. Sm–Nd, Rb–Sr возраст габброидов, гранитоидов и титаномagnetитовых руд из расслоенных интрузий кусинско-копанского комплекса (Южный Урал) // Докл. АН. 2010. Т. 432, № 5. С. 650–654.
10. Холоднов В.В., Шагалов Е.С., Бочарникова Т.Д. Верхний возрастной предел формирования рудоносных интрузий кусинско-копанского комплекса: U–Pb датирование циркона из поздних гранитов Медведевского месторождения (Южный Урал) // Литосфера. 2012. № 3. С. 99–110.
11. Chen N., Gong S.L., Xia X., Geng H., Wang L., Sun M., Kusky T.M. Zircon Hf isotope of Yingfeng Rapakivi granites from the Quanji Massif and 2.7 Ga crustal growth. // J. Earth Sci. 2013. V. 24, No. 1. P. 29–41.
12. Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D. Integrated paleomagnetism and U–Pb geochronology of mafic dikes of the Eastern Anabar shield region, Siberia: implications for Mesoproterozoic paleolatitude of Siberia and comparison with Laurentia // J. Geol. 2000. V. 108. P. 381–401.
13. Heinonen A.P., Andersen T., Rämö O.T. Re-evaluation of rapakivi petrogenesis: Source constraints from the Hf isotope composition of zircon in the rapakivi granites and associated mafic rocks of southern Finland. // J. Petrol. 2010. V. 51, No. 8. P. 1687–1709.
14. Gerdes A., Zeh A., Ronkin Yu.L. Determination of Hf isotopes in zircon by MC FS ICP-MS // XX Isotope geochemistry symposium. GEOKHI – M.: Watercolor, 2013. P. 23–26.
15. Goodge J.W., Vervoort J.D. Origin of Mesoproterozoic A-type granites in Laurentia: Hf isotope evidence // Earth Planet. Sci. Lett. 2006. V. 243. P. 711–731.
16. Puchkov V.N., Bogdanova S.V., Ernst R. et al. The ca. 1380 Ma Mashak Igneous Event of the Southern Urals // Lithos. 2013. V. 174. P. 109–124.