

УДК 551.7.1:552.31.2:550.93

ПРОЯВЛЕНИЕ ВНУТРИПЛИТНОГО МАГМАТИЗМА НА КАРЕЛЬСКОМ КРАТОНЕ 2.3 МЛРД ЛЕТ НАЗАД: К ПРОБЛЕМЕ ЭПОХИ “ЭНДОГЕННОГО ПОКОЯ” В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ

© 2014 г. А. В. Степанова, Е. Б. Сальникова, член-корреспондент РАН А. В. Самсонов,
Ю. О. Ларионова, В. С. Степанов

Поступило 10.02.2014 г.

DOI: 10.7868/S0869565214220241

Палеопротерозойская эра характеризуется активным проявлением эндогенных процессов, связанных с фрагментацией неоархейских континентов и образованием мезопротерозойского суперконтинента Коламбия (Нуна) [1]. Вместе с тем, по имеющимся данным [2], период 2.4–2.2 млрд лет характеризуется резким снижением объема магматических образований, в том числе пород основного состава, сформированных во внутриплитных условиях. Детритовые цирконы этого возраста, которые могли бы быть косвенным свидетельством эндогенной активности, также редки и малочисленны, вследствие чего этот период рассматривают как эпоху “эндогенного покоя”, когда на Земле резко доминировали экзогенные процессы [2]. Однако изотопно-геохронологические исследования последних лет выявили единичные магматические события этого возрастного интервала на разных докембрийских щитах [3], что ставит под сомнение существование столь длительного амагматического периода. Новое свидетельство внутриплитной активности в период “эндогенного покоя” зафиксировано нами в восточной части Балтийского щита.

В центральной части Карельского кратона (район оз. Верхнее Куйто) закартированы многочисленные палеопротерозойские мафические дайки [4], объединенные в три разновозрастных роя (рис. 1): ранний, сложенный дайками габброноритов СВ-простираения с возрастом ≈ 2.45 млрд лет [4], поздний, СВ-простираения, образованный дайками толеитов MORB-типа (2.14 млрд лет

[5]), и рой даек долеритов СЗ-простираения, которые являются предметом наших исследований.

Дайки долеритов, мощность которых достигает 60 м, формируют обширный рой, ориентированный в СЗ-направлении (300° – 310°) и прослеженный вкрест простираения приблизительно на 40 км от пос. Войница на севере до пос. Вокнаволоков на юге (рис. 1). Вмещающими породами являются тоналит-трондьемит-гранодиоритовые гнейсы Войницкого блока (2.8–2.9 млрд лет) и неоархейские гранулиты Вокнаволоковского блока. Установлено, что дайки долеритов секут тела оливиновых габброноритов; это определяет возраст долеритов как более “молодой”, чем 2.45 млрд лет. Значительная часть даек долеритов характеризуется высокой степенью сохранности и прослежена по простираению на несколько сотен метров, другие фрагментированы и частично амфиболитизированы.

В пределах роя опробованы тела в его северной, центральной и южной частях (рис. 1). Все изученные дайки однотипны по химическому и минеральному составу. Зоны закалки сложены клинопироксен-плагиоклазовыми порфиритами, центральные части тел – мелко-среднезернистыми фаялитсодержащими долеритами. Долериты относятся к толеитовой серии. Они формируют однородную группу пород с очень низкой магнезиальностью ($Mg\# = 0.15$ – 0.23), низкими концентрациями Cr (39–91 мкг/г) и Ni (28–47 мкг/г), высоким содержанием $Fe_2O_3^{tot}$ (17.7–19.6 мас. %), TiO_2 (2.10–2.62 мас. %) и большинства несовместимых элементов, в том числе Zr (до 225 мкг/г), Y (39–52 мкг/г), Nb (до 13 мкг/г) и РЗЭ (табл. 1). Среди геохимических особенностей следует отметить также очень слабо фракционированные спектры тяжелых РЗЭ на фоне заметного обогащения легкими лантаноидами ($(Gd/Yb)_N = 1.1$ – 1.3 , $(La/Sm)_N = 1.7$ – 1.8) и отчетливые отрицательные аномалии

*Институт геологии Карельского научного центра
Российской Академии наук, Петрозаводск*

*Институт геологии и геохронологии докембрия
Российской Академии наук, Санкт-Петербург*

*Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии
Российской Академии наук, Москва*

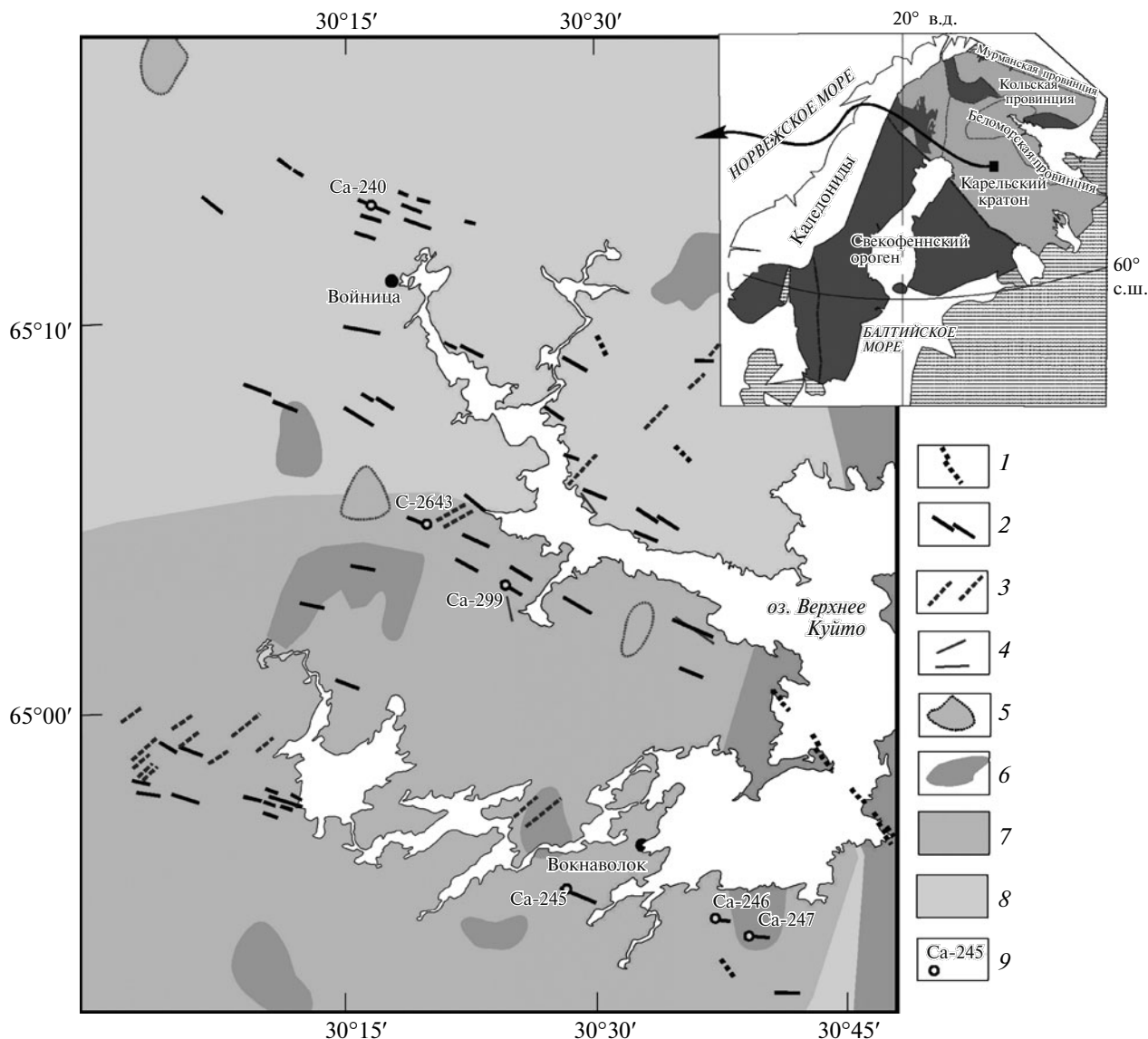


Рис. 1. Схема геологического строения района Войница—Вокнаволоок (составлена на основе геологической карты Балтийского щита масштаба 1:2000000) с использованием данных А.С. Еина [4] и данных авторов этого сообщения).

1 — дайки толеитов MORB-типа, 2140 млн лет, 2 — дайки Fe-Ti-толеитов, 2310 млн лет, 3 — дайки габброноритов, 4 — нерасчлененные дайки базитов, 5 — позднектонические граниты и пегматиты, 6 — позднектонические диорит-гранодиоритовые (санукитоидные) массивы, 7 — гнейсы Вокнаволоцкого блока, 8 — ранние тоналит-трондьемит-гранодиоритовые гнейсы, 9 — места отбора и номера проб. На врезке — схема тектонического районирования Балтийского щита.

Nb на мультиэлементных диаграммах ($Nb/Nb^* = [Nb_{PM}/(Th_{PM} \cdot La_{PM})^{1/2}] = 0.50-0.53$). По Sm-Nd изотопным характеристикам изученные дайки долеритов также близки и имеют невысокие положительные величины $\epsilon_{Nd} = +0.4...+0.8$ (табл. 1).

U-Pb геохронологические исследования проведены для двух даек из северной (проба Ca-240-5) и южной (проба Ca-245-3) частей роя. Выделение бадделита проводили по методике У. Содерлунда [6]. Из проб Ca-245-3 и Ca-240-5, масса которых составляла ≈ 1.5 кг, было выделено соответственно 250 и 100 зерен бадделита размером от 20 до

70 мкм. Среди них преобладают прозрачные длиннопризматические кристаллы темно-коричневого цвета. В подчиненном количестве присутствуют прозрачные таблитчатые кристаллы коричневого и темно-коричневого цвета.

U-Pb изотопные исследования выполнены в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург). Для изотопного анализа были использованы наиболее прозрачные кристаллы бадделита, из которого многократно удаляли поверхностные загрязнения в спирте, ацетоне, 1M HNO_3 и 1M HCl . При этом после каждой

Таблица 1. Химический состав долеритов

Оксид, элемент	Ca-240-1	Ca-240-5	Ca-240-7	Ca-240-8	Ca-240-10	Ca-245-2	Ca-245-3	Ca-245-4	Ca-246-1
SiO ₂	49.9	48.8	49.5	49.4	49.3	49.6	49.2	49.3	49.6
TiO ₂	2.21	2.49	2.15	2.22	2.25	2.61	2.57	2.57	2.27
Al ₂ O ₃	11.7	12.5	13.5	13.5	12.6	13.2	12.9	13.3	12.2
Fe ₂ O ₃	19.2	19.7	18.3	18.7	19.1	18.6	18.8	18.6	17.7
MnO	0.244	0.252	0.242	0.237	0.250	0.221	0.225	0.222	0.236
MgO	3.89	3.38	3.28	2.91	3.44	2.93	3.15	2.89	4.64
CaO	9.45	9.05	9.26	9.11	9.25	8.95	9.00	8.85	9.09
Na ₂ O	1.91	2.28	2.37	2.52	2.32	2.27	2.36	2.43	2.65
K ₂ O	0.790	0.960	0.860	0.900	0.900	1.08	1.11	1.11	0.71
P ₂ O ₅	0.24	0.25	0.27	0.25	0.23	0.34	0.36	0.37	0.25
П.п.п.	0.22	—	—	—	—	—	—	—	0.40
Сумма	99.77	99.75	99.76	99.78	99.75	99.76	99.74	99.64	99.77
Li	11.5	3.52	6.03	5.35	5.36	4.15	6.09	11.3	15.2
Sc	41.4	40.6	40.3	39.0	42.2	41.0	41.5	40.7	43.6
V	439	502	424	427	460	494	475	440	395
Cr	66.7	64.4	60.3	58.3	64.5	36.2	46.7	37.6	89.3
Co	49.9	52.1	47.7	50.6	48.1	45.4	48.9	47.6	44.7
Ni	46.4	47.2	46.0	44.2	45.4	37.1	41.4	37.7	55.8
Cu	267	330	259	287	269	268	341	379	253
Rb	24.3	25.9	20.5	22.0	23.5	27.4	30.6	30.2	19.6
Sr	157	162	153	158	154	133	142	134	154
Y	40.6	39.6	41.5	38.8	42.5	45.9	50.3	51.5	41.9
Zr	162	170	155	171	160	194	206	216	176
Nb	9.98	11.9	10.3	11.1	10.5	12.0	13.2	13.3	11.7
Ba	224	319	272	271	268	282	312	307	210
La	16.4	18.3	16.5	17.8	16.4	18.3	20.0	21	19.5
Ce	36.1	41.9	35.8	40.8	35.9	39.7	43.0	45	40.4
Pr	4.72	5.44	4.71	5.32	4.68	5.17	5.66	5.89	5.28
Nd	20.5	23.4	20.6	22.9	20.6	22.7	24.7	25.6	22.6
Sm	6.12	6.40	6.23	6.25	6.25	6.93	7.53	7.71	6.55
Eu	1.88	1.98	1.91	1.91	1.92	1.99	2.11	2.15	1.87
Gd	6.40	7.24	6.63	7.16	6.46	7.08	7.78	7.87	6.56
Tb	1.04	1.11	1.07	1.12	1.07	1.17	1.28	1.30	1.08
Dy	7.39	6.60	7.53	6.47	7.58	8.34	9.08	9.29	7.49
Ho	1.55	1.49	1.59	1.50	1.58	1.73	1.90	1.92	1.56
Er	4.53	4.76	4.62	4.69	4.67	5.12	5.53	5.69	4.57
Tm	0.648	0.680	0.652	0.668	0.666	0.727	0.781	0.796	0.644
Yb	4.51	4.64	4.55	4.55	4.67	5.04	5.46	5.54	4.48
Lu	0.626	0.688	0.644	0.676	0.652	0.706	0.763	0.770	0.630
Pb	3.92	7.60	5.43	6.60	8.24	5.29	11.02	4.38	4.83
Th	3.19	3.63	3.27	3.50	3.20	4.10	4.41	4.63	3.82
U	0.443	0.540	0.436	0.516	0.436	0.662	0.706	0.770	0.461
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd		0.1513					0.1522	0.1516	
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd		0.511980					0.511984	0.511993	

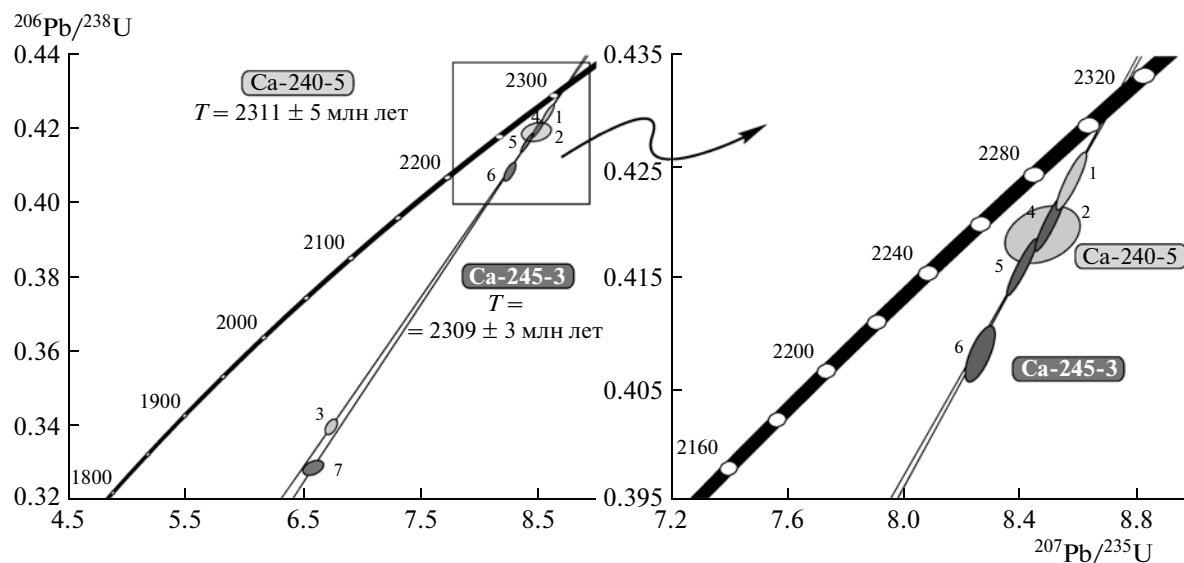


Рис. 2. Диаграмма с конкордией для бадделеита из проб Ca-240-5 и Ca-245-3. Номера точек соответствуют номерам фракций в табл. 2.

ступени зерна промывали особо чистой водой. Химическое разложение бадделеита выполняли по модифицированной методике Т.Э. Кроу [7] в тефлоновых капсулах, помещенных в стальные кожухи фирмы “Parr”, при этом ^{235}U – ^{202}Pb изотопный индикатор добавляли непосредственно перед разложением. Изотопные анализы выполнены на масс-спектрометре TRITON TI при помощи счетчика ионов. Точность определения содержания U и Pb, а также U/Pb-отношений составила 0.5%. Холостое загрязнение 1–5 пг Pb и 1 пг U. Обработку экспериментальных данных проводили при помощи программ PbDAT [8] и ISOPLOT [9]. При расчете возрастов использованы общепринятые значения констант распада урана [10]. Поправки на обычный свинец вводили в соответствии с модельными величинами [11]. Все ошибки приведены на уровне 2σ .

Для изотопных U–Pb-исследований были использованы три микронавески (9–15 зерен размером 40–50 и 50–60 мкм) бадделеита из пробы Ca-240-5 (фракции 1–3, табл. 2) и четыре микронавески (10–30 зерен размерами менее 30 и 30–40 мкм) бадделеита из пробы Ca-245-3 (фракции 4–7, табл. 2). Как видно из табл. 2 и на рис. 2, изученный бадделеит в целом характеризуется незначительной возрастной дискордантностью (1.3–2.3%). Значение его возраста, рассчитанное для верхнего пересечения дискордии, построенной для всех точек изотопного состава бадделеита из пробы Ca-240-5, составляет 2311 ± 5 млн лет (нижнее пересечение 300 ± 86 млн лет, СКВО = 0.01), а для пробы Ca-245-3 – 2309 ± 3 млн лет (нижнее пересечение 128 ± 130 млн лет, СКВО = 0.84). Полученные

оценки возраста бадделеита практически совпадают и соответствуют возрасту его кристаллизации.

Принадлежность даек к одному рою, однородность петрографических и геохимических характеристик и близкий изотопный возраст указывают на их формирование 2310 млн лет назад в результате единого магматического события. Установленные для долеритов низкие концентрации MgO, Cr и Ni в сочетании с высокими концентрациями Fe_2O_3 и TiO_2 предполагают, что эти породы являются продуктами глубокой дифференциации примитивных базальтовых магм. Соответственно, высокие концентрации элементов, несовместимых с базальтовыми расплавами, фиксируемые в долеритах, обусловлены их накоплением в остаточных расплавах в ходе дифференциации и не отражают геохимических особенностей их мантийного источника. Еще одним вероятным фактором преобразования исходных расплавов долеритов является контаминация коровым материалом. Согласно масс-балансовым расчетам, существенный (≈ 20 об. %) вклад коровой контаминанты может определять обогащенный характер распределения легких РЗЭ и отрицательные аномалии Nb в долеритах. При этом слабо фракционированные спектры тяжелых РЗЭ указывают на зарождение исходных для долеритов магм в поле стабильности шпинели, т.е. на относительно небольших глубинах. Таким образом, петрогенетические характеристики долеритов предполагают, что формирование их исходных расплавов происходило при плавлении примитивной или деплетированной мантии на небольших глубинах.

Вопросы корреляции даек долеритов возраста 2310 млн лет с основными вулканитами ятулий-

Таблица 2. Результаты U–Pb изотопных исследований бадделеита

Фракция	Размер фракции (мкм); характеристика бадделеита	U/Pb*	Pb _c /Pb _t	Изотопные отношения					Rho	Возраст, млн лет		
				²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb ^a	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
Проба Са-240-5												
1	50—60; 9 зерен, буровато-коричневые, таблитчатые	2.2	0.05	383	0.1468 ± 2	0.0492 ± 2	8.5751 ± 257	0.4237 ± 12	0.89	2294 ± 7	2278 ± 5	2309 ± 2
2	40—50; 15 зерен, светло-коричневые, длиннопризматические	2.2	0.04	229	0.1471 ± 14	0.0713 ± 4	8.4751 ± 900	0.4190 ± 13	0.30	2283 ± 20	2256 ± 8	2308 ± 20
3	40—50; 13 зерен, темно-коричневые, длиннопризматические	2.9	0.01	406	0.1438 ± 7	0.0396 ± 3	6.7373 ± 404	0.3398 ± 10	0.48	2078 ± 12	1886 ± 6	2274 ± 10
Проба Са-245-3												
4	30—40; 14 зерен, светло-коричневые, таблитчатые	2	0.08	280	0.1468 ± 3	0.0465 ± 2	8.5001 ± 357	0.4200 ± 13	0.92	2286 ± 9	2261 ± 7	2309 ± 3
5	<30; 20 зерен, светло-коричневые, длиннопризматические	2.3	0.01	307	0.1465 ± 3	0.0343 ± 3	8.4035 ± 420	0.4161 ± 21	0.93	2276 ± 11	2243 ± 11	2305 ± 3
6	<30; 30 зерен, темно-коричневые, длиннопризматические	2	0.09	254	0.1465 ± 5	0.0582 ± 3	8.2586 ± 429	0.4083 ± 14	0.70	2260 ± 11	2207 ± 10	2308 ± 6
7	<30; 10 зерен, светло-коричневые, длиннопризматические	1.9	0.25	125	0.1453 ± 14	0.0707 ± 4	6.5881 ± 777	0.3288 ± 16	0.40	2058 ± 20	1833 ± 9	2292 ± 19

Примечания. Pb_c — обычный свинец, Pb_t — общий свинец;^a измеренные изотопные отношения; Rho — коэффициент корреляции ошибок отношений ²⁰⁷Pb/²³⁵U — ²⁰⁶Pb/²³⁸U. Величины ошибок (2σ) соответствуют последним значащим цифрам.

* Навеску бадделеита не определяли.

ского стратиграфического уровня остаются открытыми, что в значительной мере связано с недостатком геохимических и изотопных данных по вулканитам. Сравнение датированных долеритов и базальтов из вулканогенно-осадочных разрезов ятулия Центральной Карелии [12] выявляет заметные различия их составов. Причины этого могут быть разнообразными — от высокой степени метасоматических изменений базальтов до латеральных вариаций составов ятулийских вулканитов на Карельском кратоне. В настоящее время достаточно уверенно можно говорить о том, что ближайшими геохимическими и возрастными аналогами изученных даек в Карельском кратоне являются базальты Рункаус, которые залегают в нижней части ятулийского разреза пояса Перяпохья и по результатам изучения Sm—Nd изотопной системы валовых проб имеют оценку возраста ≈ 2.3 млрд лет [13]. Эти данные и результаты изучения даек долеритов возраста 2.34 млрд лет в блоке Тайвалкоски в Восточной Финляндии [14], вероятно, свидетельствуют о значительно более широком распространении базитов этой возрастной группы.

Зафиксированный эпизод формирования даек 2.31 млрд лет назад является отражением одного из этапов палеопротерозойского внутриплитного магматизма в пределах архейского континента. По геохимическим особенностям долериты этого этапа контрастно отличаются от предшествующих габброноритов (2.45 млрд лет), связанных с подъемом глубинного мантийного плюма [15], и имеют некоторые черты сходства с более поздними (2.14 млрд лет) толеитами MORB-типа, которые фиксируют раскол архейской литосферы. Последнее позволяет предположить, что дайки долеритов с возрастом 2.31 млрд лет отвечают предраскольному этапу или эпизоду “несостоявшегося раскола” континентальной литосферы. Это подтверждается высокой степенью фракционирования расплавов и значительной контаминацией их коровым материалом, что предполагает длительное нахождение расплавов в промежуточных коровых камерах.

Следует отметить также, что полученные нами данные и результаты изучения магматических комплексов других кратонов [3] свидетельствуют о том, что палеопротерозойская эпоха “эндоген-

ного покоя”, вероятно, была не столь глобальна, как предполагалось ранее, а одной из возможных причин выделения этого периода может являться недостаточная изученность раннедокембрийских магматических комплексов.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 14–05–00432).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nance R.D., Murphy J.B., Santosh M. // *Gondwana Res.* 2013. V. 25. № 1. P. 4–29.
2. Condie K.C., O'Neill C., Aster R.C. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 282. № 1/4. P. 294–298.
3. Partin C.A., Bekker A., Sylvester P.J., Wodicka N., Stern R.A., Chacko T., Heaman L.M. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2014. V. 388. P. 123–133.
4. Ейн А.С. В кн.: Интрузивные базиты и гипербазиты Карелии. Петрозаводск, 1984. С. 30–41.
5. Stepanova A.V., Samsonov A.V., Larionova Y.O., Salnikova E.B., Stepanov V.S. *Supercontinent Symposium.* Helsinki, 2012. P. 137.
6. Söderlund U., Johansson L. // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2002. V. 3. № 2. P. 1–7.
7. Krogh T.E. // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1973. V. 37. № 3. P. 485–494.
8. Ludwig K.R. PbDat for MS-DOS. Vers. 1.21 // U.S. Geol. Surv. Open File Rept 88-542. 1991. 35 p.
9. Ludwig K.R. ISOPLOT/Ex. Vers. 2.06. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // *Berkeley Geochronol. Center Spec. Publ.* 1999. № 1a. 49 p.
10. Steiger R.H., Jäger E. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1977. V. 36. № 3. P. 359–362.
11. Stacey J.S., Kramers J.D. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1975. V. 26. № 2. P. 207–221.
12. Малашин М.В., Голубев А.И., Иваников В.В., Филиппов Н.Б. // *Вестн. СПбГУ. Сер. 7.* 2003. № 1. С. 3–32.
13. Huhma H., Cliff R.A., Perttunen V., Sakko M. // *Contribs Mineral. and Petrol.* 1990. V. 104. № 3. P. 369–379.
14. Salminen J., Halls H.C., Mertanen S., Pesonen L.J., Vuollo J., Söderlund U. // *Precambrian Res.* 2014. V. 244. P. 87–99.
15. Puchtel I.S., Haase K., Hofmann A., Chauvel C., Kulikov V.S., Gabre-Schonberg C.-D., Nemchin A.A. // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1997. V. 61. № 6. P. 1205–1222.