

Архейский эндербитовый магматизм Кольского региона: U-Pb (SHRIMP-RG), Lu-Hf и Sm-Nd изотопно-геохронологические характеристики

Кудряшов Н.М.¹, Удоратина О.В.², Баянова Т.Б.¹, Мокрушин А.В.¹, Кобл М.А.³

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, nik@geoksc.apatity.ru; bayanova@geoksc.apatity.ru; mokrushin@geoksc.apatity.ru

² Институт Геологии КомиНЦ УрО РАН, Сыктывкар, udoratina@geo.komisc.ru

³ Стэнфордский университет, США, coblem@stanford.edu

Аннотация. В работе приведены изотопно-геохронологические данные для архейских эндербитов Канентъяврского комплекса. Исследование циркона магматического генезиса из массивных эндербитов локальным U-Pb (SHRIMP-RG) методом определяет время кристаллизации 2783 ± 14 млн. лет. Величина $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ в цирконе варьирует от -9.5 до +2.4, модельные значения $T_{\text{Hf}}(\text{DM}) = 3.14\text{--}2.96$ млрд. лет. Sm-Nd модельные возрасты эндербитов составили 3.07–2.96 млрд. лет. Магматические расплавы мезо-неоархейских эндербитов с возрастом ~2.8 млрд. лет были образованы за счет частичного плавления нижнекоровых базитов на рубеже 3.1–2.9 млрд. лет. Последующая эволюция исходных магм протолитов при подъеме к поверхности могла определяться преимущественно процессами их контаминации веществом древней палеоархейской коры ($T_{\text{DM2}}^{\circ} = 3.4\text{--}3.2$ млрд. лет) или путем смешения с верхнекоровыми расплавами.

Ключевые слова: Эндербиты, циркон, U-Pb (SHRIMP-RG), Lu-Hf, Sm-Nd, Фенноскандинавский щит, архей.

Archaean enderbite magmatism of the Kola region: U-Pb (SHRIMP-RG), Lu-Hf and Sm-Nd isotope-geochronological characteristics

Kudryashov N.M.¹, Udoratina O.V.², Bayanova T.B.¹, Mokrushin A.V.¹, Coble M.A.³

¹ Geological Institute KSC RAS, Apatity, Russia, nik@geoksc.apatity.ru; bayanovak@geoksc.apatity.ru; mokrushin@geoksc.apatity.ru

² Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia, udoratina@geo.komisc.ru

³ Stanford University, Stanford, USA, coblem@stanford.edu

Abstract. The article presents isotope-geochronological data for Archaean enderbites of the Kanentyavr complex. The study of zircon of magmatic genesis from massive enderbites by the in-situ U-Pb (SHRIMP-RG) method determines the crystallization age of 2783 ± 14 Ma. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value in zircon varies from -9.5 to +2.4, model age $T_{\text{Hf}}(\text{DM}) = 3.14\text{--}2.96$ Ga. The Sm-Nd model ages of the enderbites lie within a fairly narrow range of 3.07–2.96 Ga. The magmatic melts of Meso-Neoarchaeal enderbites (~2.8 Ga) were derived from partial melting of the lower-crust basites at the period of 3.1–2.9 Ga. The subsequent evolution of the initial magmas during the ascent to the surface could be determined mainly by the processes of their contamination with the ancient Palaeoarchaeal crust ($T_{\text{DM2}}^{\circ} = 3.4\text{--}3.2$ Ga) or by mixing with upper-crust melts.

Keywords: enderbites, zircon, U-Pb (SHRIMP-RG), Lu-Hf, Sm-Nd, Fennoscandian Shield, Archaean.

Введение

Кольский регион расположен в северо-восточной части Фенноскандинавского щита и сложен крупными блоками архейской коры, разделенных архей-протерозойскими поясами (рис. 1). Эндербитовый магматизм архейского возраста проявлен в двух крупных блоках: Мурманском и Кольско-Норвежском. Мурманский блок сложен преимущественно тоналит-грондьемит-гранодиоритовыми (ТТГ) гнейсами амфиболитовой фации метаморфизма, палингенно-метасоматическими плаггиогранитами и небольшими телами гнейсов с реликтами пород гранулитовой фации. Архейские породы Кольско-Норвежского блока представлены метаморфизованными парагнейсами и кристаллическими сланцами, а также тоналит-грондьемитовыми, чарнокитовыми и эндербитовыми гранито-гнейсами. Более поздние палеопротерозойские эндербиты, с возрастом 2.0–1.9 млрд. лет,

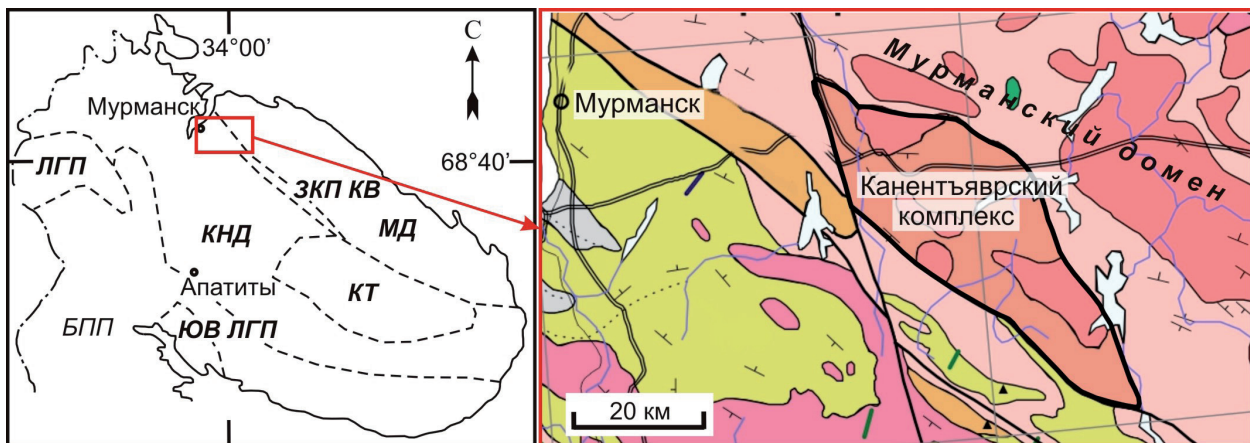


Рис. 1. Схема расположения Канентъяврского комплекса. БПП – Беломорский подвижный пояс; ЛГП – Лапландский гранулитовый пояс; ЮВ ЛГП – южная ветвь Лапландского гранулитового пояса; КНБ – Кольско-Норвежский блок; КБ – Кейвский блок; МБ – Мурманский блок; ЗКП КВ – Зеленокаменный пояс Колмоzero-Воронья.

Fig. 1. Geological map of the Kanent'yavr complex. BMP – Belomorian mobile belt; LGB – Lapland granulite belt; SE LGB – southern branch of the Lapland granulite belt; KNB – Kola-Norwegian block; KB – Keivsky block; MB – Murmansk block; GB KV – Kolmozero-Voronya Greenstone Belt.

обнажаются в Лапландском гранулитовом поясе (ЛГП), а также в Умбинском блоке южной ветви ЛГП (рис. 1).

Эндербиты (гиперстеновые и двупироксеновые плагиогранитоиды) установлены в юго-западной и восточной частях Мурманского блока. В восточной части эндербиты образуют как крупные тела размерами до десятков километров, приуроченные к ядерным частям антиклинальных структур, сложенных биотитовыми, амфибол-биотитовыми плагиогранитами и тоналитами), так и небольшие участки размерами до нескольких метров, встречающиеся среди гранитоидов палингенно-метасоматической формации (Ветрин, 1979). К одному из наиболее крупных тел эндербитов относится Канентъяврский массив, расположенный на границе Мурманского и Кольско-Норвежского блоков (рис. 1), традиционно считающийся древнейшим гранитоидным комплексом Кольского региона (Виноградов, Виноградова, 1979; Ветрин, 1984).

Геологическое положение и состав пород

Канентъяврский массив представляет собой тектонический блок, ограниченный разломами субширотного и субмеридионального простирания, и сложен биотит-гиперстеновыми гранитоидами – эндербитами, варьирующими по меланократовости от тоналитов до лейкократовых плагиогранитов. Эндербиты выделяются в виде отдельных пятнистых полей и неясно выраженных зон северо-восточного простирания с постепенными переходами к плагиогранитам, плагиомикроклиновым гранитам и гранитогнейсам. Иногда эндербиты облекаются зонами расланцевания, в которых наблюдаются крупнозернистые лейкократовые плагиограниты с гнездами биотита и амфибола. Среди массивных эндербитов в небольшом количестве встречаются линзовидные и пластообразные тела мелкозернистых амфиболлизированных двупироксеновых кристаллосланцев – пород гранулитовой фации метаморфизма, а также ксенолиты диопсидовых амфиболитов и биотит-амфиболовых гнейсов, инъецированных прожилками гиперстеновых плагиогранитов и плагиоаплитов. Эндербиты массива представляют собой однородные плотные породы серой или коричневатой-серой окраски, массивной или неясно гнейсовидной текстуры. Структура пород преимущественно аллотриоморфнозернистая, гранобластовая. Состоят из плагиоклаза – 35–50 %, кварца – 15–30 %, ортопироксена – 5–10 %, красновато-коричневого высокотитанистого биотита – 5–15 %; акцессорных минералов: титанита, апатита, циркона. Химический состав: SiO_2 – 69.79, TiO_2 – 0.24, Al_2O_3 – 15.79, Fe_2O_3 – 0.10, FeO – 2.95, MnO – 0.03, MgO – 0.90, CaO – 4.69, Na_2O – 4.31, K_2O – 0.14. Биотиты эндербитов по соотношению TiO_2 и F_{Bt} соответствуют биотитам гранулитовой фации. Содержания

Al_2O_3 в ортопироксенах относительно невысокое (0.6 мас. %), что свидетельствует о формировании пород в умереннобарической гранулитовой фации метаморфизма (Козлов и др., 2006). Значения железистости $FeO_{\text{общ}}/(FeO_{\text{общ}} + MgO) = 0.60\text{--}0.74$ и индекс MAlI соответствуют магнезиальной щелочно-известковой группе эндрбитов (Frost et al., 2001). Индекс насыщенности глинозёмом $A/CNK = 0.9$. Породы имеют фракционированное распределение РЗЭ ($(La/Yb)_n = 9\text{--}12$) и обеднены тяжёлыми РЗЭ ($(Gd/Yb)_n = 2.7\text{--}3.2$).

Результаты изотопно-геохронологического исследования

Для изотопно-геохронологических и геохимических исследований была взята проба из массивных эндрбитов. Циркон в пробе представлен одной генерацией – это дипирамидально-призматические зерна розоватого цвета, ребра кристаллов сглажены, $Ku = 2\text{--}4$. В катодоллюминесценции в цирконе часто присутствует эвгдральная зональность, в некоторых кристаллах отмечаются тонкие каймы обрастания (рис. 2). В центральных участках кристаллов содержания $U = 126\text{--}236$ ppm, $Th/U = 0.12\text{--}1.07$, в краевых зонах $U = 17\text{--}78$ ppm, $Th = 3\text{--}15$ ppm, $Th/U = 0.2\text{--}0.6$.

Спектры РЗЭ в исследованных цирконах сходны между собой и имеют дифференцированный характер распределения от легких к тяжелым с хорошо выраженной положительной Ce-аномалией



Рис. 2. Катодоллюминесцентное изображение циркона из эндрбитов Канентъяврского массива. Сплошными кружками отмечены места датирования и возраст по $^{207}Pb/^{206}Pb$. Штриховыми кружками отмечены места измерения Lu-Hf методом и значения $\epsilon Hf(t)$ и $T(DM)$.

Fig. 2. Cathodoluminescence images of zircon grains from enderbite of the Kanentyavr massif. White circles indicate the analytical spots and $^{207}Pb/^{206}Pb$ age, Ma. Dashed yellow circles indicate the analytical spots by the Lu-Hf method and the values of $\epsilon Hf(t)$ and $T(DM)$.

($Ce/Ce^* = 7\text{--}344$) (рис. 3). Центральные части кристаллов преимущественно характеризуются высоким содержанием РЗЭ (354–968 ppm) и пологим спектром легких РЗЭ (Sm_n/La_n варьирует от 2.9 до 45.6 ppm). Краевые части циркона отличаются меньшим содержанием РЗЭ (89–223 ppm) и имеют отрицательную аномалию Nd (табл. 1, рис. 3). Описанные спектры распределения характерны для циркона магматического генезиса (Hoskin, 2005).

Температуры кристаллизации циркона из эндрбитов рассчитаны по насыщению цирконием с использованием термометра (Watson, Harrison, 1983) и находятся в диапазоне $675\text{--}777^\circ C$.

Локальное U-Pb изотопно-геохронологическое исследование циркона было выполнено в центре SUMAC Стэнфордского университета и Геологической службы США на ионном мультиколлекторном микрозонде SHRIMP-RG по методике (Ireland, 1995). Возраст по верхнему пересечению с конкордией для восьми проанализированных точек циркона составил 2783 ± 14 млн. лет, $СКВО = 4.0$, нижнее пересечение отвечает современным потерям свинца (табл. 2, рис. 4). Полученный возраст интерпретируется как время кристаллизации циркона из расплава при образовании пород массива в условиях гранулитовой фации метаморфизма.

Таблица 1. Содержания иттрия, редкоземельных элементов, железа и титана (ppm) и температура кристаллизации исследованных цирконов.
 Table. 1. Content of yttrium, rare earth elements, iron and titanium (ppm) and crystallization temperature in the studied zircons.

Точка/ Элемент	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.1	9.2
Ti ⁴⁸	2.1	6.5	4.2	4.8	4.3	5.0	4.8	3.6	4.3	4.1
Fe	1.6	67.6	1.4	76.8	2.4	59.1	3.9	15.4	1.5	31.9
Y	116	618	313	994	234	1415	1308	421	273	232
La	0.005	4.56	0.004	1.14	0.013	0.338	0.018	1.27	0.002	0.057
Ce	5.11	98.9	9.58	50.9	7.51	33.4	29.3	32.4	6.78	10.0
Nd	0.09	46.3	0.25	33.9	0.15	11.8	3.16	15.0	0.17	2.12
Sm	0.29	8.52	0.63	18.2	0.58	9.6	5.9	4.5	0.21	1.67
Eu	0.13	4.16	0.46	5.8	0.14	4.7	3.4	1.66	0.63	0.66
Gd	2.29	24.8	8.93	59.9	6.57	58.4	56.2	15.1	7.96	7.03
Dy	11.3	56.5	28.7	111	22.0	151	148	36.4	27.3	23.3
Er	19.7	113	57.9	168	43.7	251	222	79.5	47.1	41.4
Yb	50.5	249	117	284	77.2	449	371	168	86.7	80.5
Hf	10291	11731	9965	8986	10462	11020	8149	11055	9995	9665
Th/U	0.13	0.12	0.19	0.47	0.18	0.47	1.07	0.18	0.37	0.32
Eu/Eu*	0.46	0.87	0.59	0.53	0.21	0.61	0.57	0.60	1.48	0.59
Ce/Ce*	247	7	291	8	165	17	122	7	344	29
ΣREE	89	606	224	733	158	969	839	354	177	167
ΣLREE	5.5	158	10.5	104	8.3	55.1	38.4	53.3	7.2	13.8
ΣHREE	83	444	213	623	150	909	797	299	169	152
Ybn/Lan	16414	80	39460	365	8534	1957	30147	195	56364	2092
Smn/Lan	104	3.0	231	26	69	46	526	5.7	150	47
T(Ti), C °	675	777	735	748	738	751	749	722	739	732

Температуры кристаллизации циркона из эндербитов рассчитаны по насыщению цирконием с использованием термометра (Watson, Harrison, 1983) и находятся в диапазоне 675–777 °С.

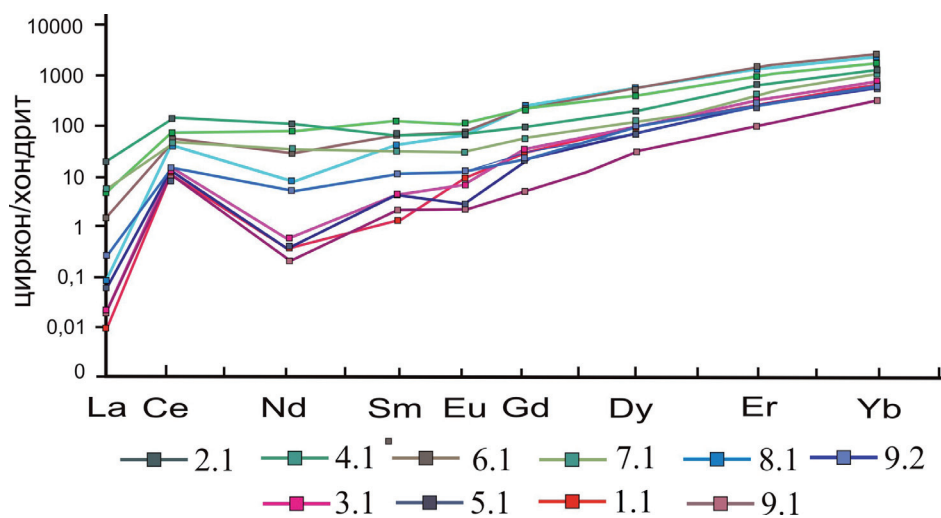


Рис. 3. Распределение РЗЭ в цирконе из эндербитов, нормирован на хондрит по (McDonough, Sun, 1995).
 Fig. 3. REE distribution in zircon from enderbite, chondrite-normalized after (McDonough, Sun, 1995).

Локальное U-Pb изотопно-геохронологическое исследование циркона было выполнено в центре SUMAC Стэнфордского университета и Геологической службы США на ионном мультиколлекторном микрозонде SHRIMP-RG по методике (Ireland, 1995). Возраст по верхнему пересечению с конкордией для восьми проанализированных точек циркона составил 2783 ± 14 млн. лет, СКВО=4.0, нижнее пересечение отвечает современным потерям свинца (табл. 2, рис. 4). Полученный возраст интерпретируется как время кристаллизации циркона из расплава при образовании пород массива в условиях гранулитовой фации метаморфизма.

Таблица 2. Результаты U-Pb изотопного датирования циркона из эндербитов Канентъяврского массива (CEV-3).

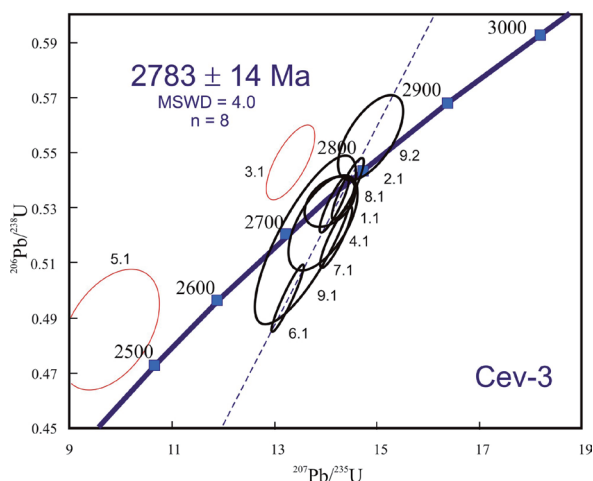


Рис. 4. Диаграмма с конкордией для циркона из эндербитов Канентъяврского массива. Черные эллипсы – аналитические данные, включенные в расчет возраста. Красные эллипсы – не включенные в расчет возраста.

Fig. 4. Concordia diagram for the zircon from the Kanentyavr enderbite. Black ellipses – analytical data included in the discordance calculation; red ellipses – not included in the discordance calculation.

Table 2. Results of the U-Pb dating of zircons from the Kanentyavr enderbite (CEV-3).

№ точки анализа	$^{206}\text{Pb}_c$ %	Содержания, ppm			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	Изотопные отношения \pm %			Rho	Возраст, млн. лет		D, %
		$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
5.1	2.56	7	17	3	0.18	0.146 ± 4.5	9.77 ± 8.0	0.485 ± 3.8	0.47	2550 ± 79	2300 ± 99	-13
3.1	0.78	36	78	14	0.19	0.177 ± 1.7	13.34 ± 2.8	0.546 ± 2.0	0.71	2810 ± 46	2625 ± 33	-9
9.1	2.15	19	42	15	0.37	0.191 ± 2.5	13.65 ± 6.1	0.519 ± 5.0	0.82	2695 ± 99	2748 ± 57	+2
2.1	0.15	207	451	51	0.12	0.192 ± 2.6	14.14 ± 3.0	0.533 ± 1.4	0.47	2753 ± 32	2763 ± 44	0
1.1	0.80	17	37	5	0.13	0.193 ± 2.7	13.96 ± 4.0	0.525 ± 2.6	0.66	2719 ± 59	2768 ± 50	+2
6.1	0.36	101	236	107	0.47	0.194 ± 0.6	13.28 ± 2.1	0.498 ± 2.0	0.95	2603 ± 43	2773 ± 11	+7
8.1	0.38	98	215	38	0.18	0.194 ± 2.6	14.19 ± 1.7	0.531 ± 1.6	0.92	2747 ± 35	2774 ± 11	+1
9.2	1.06	27	57	18	0.32	0.195 ± 0.3	14.90 ± 3.6	0.556 ± 2.3	0.65	2848 ± 53	2781 ± 44	-3
4.1	0.29	82	179	82	0.47	0.195 ± 0.8	14.45 ± 1.8	0.537 ± 1.6	0.90	2770 ± 36	2787 ± 13	+1
7.1	0.26	56	126	131	1.07	0.198 ± 0.9	14.22 ± 1.9	0.520 ± 1.8	0.90	2698 ± 39	2814 ± 14	+5

Примечание. Ошибка в калибровке стандарта соответствовала 0.15 %. Погрешности даны на уровне 1σ . $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ указывают содержания обыкновенного и радиогенного свинца, соответственно. Измеренные отношения скорректированы на ^{204}Pb . D – дискордантность: $D = 100 \times [\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rho – коэффициент корреляции между ошибками определения отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

Notes: Error in the calibration standard is 0.15 %. Errors are 1σ . $^{206}\text{Pb}_c$ and $^{206}\text{Pb}^*$ – common and radiogenic lead; corrected ratios and ^{206}Pb content are corrected for ^{204}Pb . D is discordance: $D = 100 \times [\text{age } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{age } (^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rho is the error correlation coefficient of radiogenic $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

Величина $\epsilon\text{Hf}(t)$ варьирует от -9.5 до +2.4, модельные значения $T(\text{DM}) = 3.14\text{--}2.96$ (рис. 2). Sm-Nd модельные возрасты эндербитов составили 3.07–2.96 млрд. лет. Время нахождения протолитов в коре, определяемое разницей между модельным возрастом и временем кристаллизации циркона эндербитов, оценивается в 180–290 млн. лет. $\epsilon\text{Nd}(t)$ характеризуются положительными значениями +0.8–+1.8.

Заключение

Полученные результаты указывают, что магмы основного состава вносили свой главный вклад в частичное плавление нижней коры с образованием средних и кислых расплавов. Предполагается, что в период 3.1–2.9 млрд. лет назад к основанию литосферной мантии всплыл астеносферный диапир, приведший к ее плавлению с образованием базитовых расплавов в основании нижней коры, которые в верхней коре представлены ксенолитами в плагиогнейсах. Магматические расплавы мезо-неоархейских эндербитов с возрастом ~2.8 млрд. лет были образованы за счет частичного плавления нижнекоровых базитов. Последующая эволюция исходных магм протолитов при подъеме к поверхности могла определяться преимущественно процессами их контаминации веществом древней палеоархейской коры ($T_{DM2}^{\circ} = 3.4\text{--}3.2$ млрд. лет) или путем смешения с верхнекоровыми расплавами. Тектоническое положение Канентъяврского массива эндербитов определяется коллизионными процессами Мурманского и Кольско-Норвежского блоков в условиях метаморфизма гранулитовой фации.

Исследования проведены по гранту РФФИ № 22-27-00589 и госзаданию ГИ КНЦ РАН № 0231-2019-0053.

Литература

1. Ветрин В.Р. Древнейшие гранитоидные комплексы Мурманского кристаллического массива // Древнейшие гранитоиды Балтийского щита. АН СССР. 1979. С. 50–91.
2. Ветрин В.Р. Гранитоиды Мурманского блока. Апатиты. Изд-во: КФАН СССР. 1984. 124 с.
3. Виноградов А.Н., Виноградова Г.В. Эндербиты Канентъяврского массива и проблема петрохимического типа первичнокоровых гранитов // Древнейшие гранитоиды Балтийского щита. АН СССР. 1979. С. 91–116.
4. Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев В.Н. и др. Геология архея Балтийского щита. СПб. Изд-во: Наука. 2006. 345 с.
5. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J. et. al. A geochemical classification for granitic rocks // J. Petrol. 2001. V. 42. P. 2033–2048.
6. Hoskin P.W.O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. V. 69. P. 637–648.
7. McDonough W.F., Sun Sh.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. P. 223–253.
8. Ireland T.R. Ion Microprobe Mass-Spectrometry: Techniques and Applications in Cosmochemistry and Geochronology // Advances in Analytical Geochemistry. 1995. V. 2. P. 1–118.
9. Watson E.B., Harrison T.M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // Earth Planet. Sci. Lett., 1983. V. 6. P. 295–304.