

УДК 550.93(470.21)

## ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА НЕОАРХЕЙСКИХ СУБЩЕЛОЧНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД КЕЙВСКОЙ СТРУКТУРЫ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

В. Р. Ветрин

Представлено академиком РАН Л.Н. Когарко 24.04.2019 г.

Поступило 24.04.2019 г.

Неоархейский субщелочной магматизм Кейвской структуры проявлен в образовании вулcano-плутонической ассоциации латитов–монцонитов–гранитов (АЛМГ). Величина измеренного отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в породах определена в 0,511061–0,511365, и значения модельных возрастов расположены в возрастном интервале от 3,14 до 3,21 млрд лет при  $\epsilon\text{Nd}_{(2670)}$  от 2,2 до –1,3. Начальные отношения  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  в цирконе находятся в пределах 0,280950–0,281069, и точки состава образуют поле в районе тренда эволюции однородного хондритового резервуара. По изотопно-геохимическим данным для всех пород предполагается базитовый состав протолитов. По величине  $\epsilon\text{Hf}(T)$  точки состава циркона локализованы в области развития коры с  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,015$  и возрастaми в 3,0–3,3 млрд лет. Это свидетельствует, вероятно, об образовании исходных расплавов преимущественно за счёт вещества с длительным временем нахождения в коре. Образование исходных расплавов АЛМГ предполагается при плавлении метасоматически изменённых пород основного состава при внедрении в нижнюю кору интрузий базальтового состава, исходных для пород дайкового комплекса и интрузий габбро-лабрадоритов в верхней коре.

*Ключевые слова:* неоархейские субщелочные породы, изотопные Sm–Nd-, Lu–Hf-системы, петрология, Кольский полуостров.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-5652488167-70>

Первые геологически значимые проявления щелочного магматизма во многих кратонах приурочены к интервалу времени 2,5–2,7 млрд лет [1]. Одним из таких регионов является Кольский полуостров, в центральной части которого расположена неоархейская щелочная провинция, занимающая площадь более 2500 км<sup>2</sup> и сложенная породами субщелочного состава, щелочными гранитами, щелочными и нефелиновыми сиенитами. Субщелочной магматизм Кейвской структуры проявлен в образовании вулcano-плутонической ассоциации латитов–монцонитов–гранитов (АЛМГ), по геологическим данным более ранней по отношению к щелочным гранитам. U–Pb-возраст циркона из пород ассоциации определён в  $2674 \pm 6$  млн лет и отражает время кристаллизации пород [2]. Породы АЛМГ имеют метаглинозёмистый состав, пониженную величину отношения  $\text{Al}/(\text{Na} + \text{K})$ , высокую железистость, повышенные концентрации крупно-

ионных, высокозарядных и редкоземельных элементов, и по этим критериям отвечают гранитам  $A_2$ -типа [3].

В настоящем сообщении приведены результаты изучения изотопных Sm–Nd- и Lu–Hf-систем в породах и минералах с целью определения источников вещества для АЛМГ, близких по возрасту и особенностям химического состава к неоархейским щелочным гранитам Кейвской структуры [2]. Измерения концентраций Sm, Nd и изотопного состава Nd в породах и породообразующих минералах выполнены на масс-спектрометре TRITON TI фирмы “ThermoFinnigan” МАТ в ЦИИ ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург). Изотопный состав Hf в цирконе из датированных на SHRIMP-II кристаллах [2] определён в Университете Маквари (Сидней, Австралия) методом лазерной абляции по методике [4]. Вычисление модельного возраста выполнено по двухстадийной модели ( $T(\text{DM})^C(\text{Ga})$ ) при среднем значении  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,015$  для коры в целом.

Исследованные породы содержат 9,1–13,5 ppm Sm и 47,9–69,2 ppm Nd, отношение  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  составляет 0,11–0,12 и соответствует его среднекоровому значению ( $0,118 \pm 0,017$ ). Величина измеренного

Геологический институт Кольского научного центра  
Российской Академии наук, Апатиты Мурманской обл.  
Институт минералогии, геохимии, кристаллохимии редких  
элементов (ИМГРЭ), Москва  
E-mail: vetrin@geoksc.apatity.ru

Таблица 1. Изотопные Sm-Nd-данные для пород и минералов

№ образца	Порода	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(0)$	$\epsilon\text{Nd}(T)$	$T$ (DM), 2-st млрд лет
10	КЛ	9,12	47,86	0,115	0,511262±3	-26,8	1,2	3,14
"	Hbl	16,05	75,52	0,129	0,511388±4			
"	Bt	6,91	42,76	0,098	0,511083±6			
16	КМ	13,54	69,23	0,118	0,511365±8	-24,8	2,2	3,17
"	Hbl	58,14	182,80	0,192	0,511517±5			
"	Bt	10,57	85,19	0,075	0,511091±3			
"	Срх	11,64	56,18	0,125	0,511449±5			
"	Ilm	3,85	23,00	0,101	0,511162±5			
8	КЛ	10,76	58,41	0,111	0,511100±20	-30	-0,7	3,15
17	КМ	11,31	61,22	0,111	0,511061±5	-30,8	-1,3	3,21

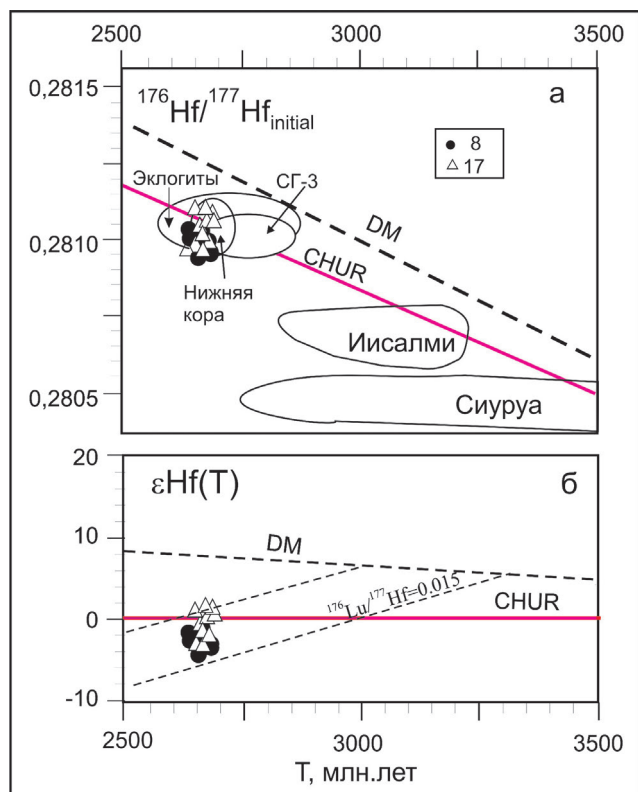
Примечание. Hbl — роговая обманка. Bt — биотит, Срх — клинопироксен, Ilm — ильменит, КЛ — кварцевый латит, КМ — кварцевый монзонит.

отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в породах определена в 0,511061–0,511365, и значения модельных возрастов расположены в узком возрастном интервале от 3,14 до 3,21 млрд лет при  $\epsilon\text{Nd}_{(2670)}$  от 2,2 до -1,3 (табл. 1). Эти данные определяют мезоархейский возраст протолита и участие в составе пород ассоциации как корового, так и мантийного вещества. В настоящее время в пределах Кейвской структуры породы мезоархейского возраста достоверно не установлены, но их наличие можно предполагать в составе базитовой нижней коры или гранулит-базитового слоя, верхняя часть которого в пределах Кейвской структуры предполагается на глубинах более 3–4 км [5]. В пределах Балтийского щита породы с возрастными 3,2–3,6 млрд лет выявлены в различных частях Карельского региона, а также в северо-западной части Кольской провинции [6]. На диаграммах в координатах  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  породы и породообразующие минералы характеризуются изохронными зависимостями с возрастными в  $1817\pm 72$  и  $1510\pm 51$  млн лет. Полученные датировки существенно меньше возраста пород, определённого U–Pb-методом по циркону, и в пределах ошибок определения близки к значениям возраста протерозойского метаморфизма и метасоматоза, проявленных в пределах Кейвской структуры (1,95–1,5 млрд лет [7]) и расположенной к югу структуры Имандра-Варзуга. Обычно предполагается неизменность отношения Sm/Nd во время внутрикорового плавления, метаморфизма, эрозии и переотложения материала, что обусловлено сходством геохимических свойств Sm и Nd. Величина отношения Sm/Nd в изученных породах колеблется незначительно (0,18–0,19), и наличие изохронных зависимостей со снижением цифр определяемого возраста было обусловлено, вероятно, перераспределением изотопов Sm и Nd между древними и новообразован-

ными минералами породы в процессе протерозойского метаморфизма.

Изотопная Lu–Hf-система изучена в цирконе из образцов кварцевого латита и кварцевого монзонита. Двухстадийный модельный возраст циркона  $T_{\text{Hf}}(\text{DM})$  составляет 3,05–3,39 млрд лет и близок возрасту  $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$  вмещающих пород, что обусловлено, вероятно, сингенетичностью породы и циркона. Этот вывод подтверждается нахождением точек состава циркона в области ТА (Terrestrial Array), определяющей когерентность изотопных Sm–Nd- и Lu–Hf-систем рассматриваемых пород и циркона в процессе магматической дифференциации [8]. Начальные отношения  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  находятся в пределах 0,280950–0,281069, и точки состава циркона образуют поле в районе тренда эволюции однородного хондритового резервуара (CHUR, рис. 1а). Изученные кристаллы циркона располагаются в полях составов этого минерала из плаггиогнейсов Кольской сверхглубокой скважины, эклогитов южной части Кольского полуострова и главным образом в поле составов неархейских кристаллов циркона из ксенолитов гранатовых гранулитов нижней коры. Для всех рассматриваемых пород предполагается базитовый состав протолитов [9]. По величине  $\epsilon\text{Hf}(T)$  точки состава циркона локализованы в области развития коры с  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,015$  и возрастными в 3,0–3,3 млрд лет (рис. 1б). Это свидетельствует, вероятно, об образовании исходных расплавов преимущественно за счёт вещества с длительным временем нахождения в коре.

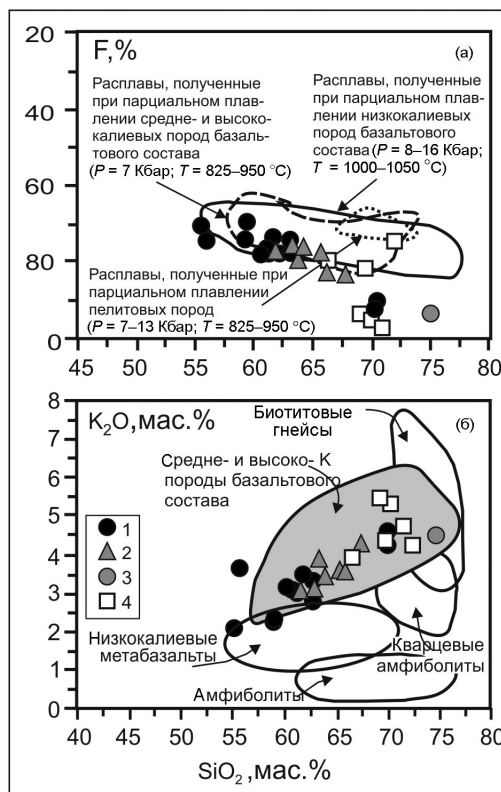
Образование гранитов А-типа предполагается как при дифференциации мантийных магм основного и среднего составов, так и при плавлении метамагматических коровых пород, в ряде случаев испытывавших щелочной метасоматоз [10]. Породы АЛМГ содержат повышенные концентрации круп-



**Рис. 1.** Диаграммы в координатах “возраст, млн лет– $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{initial}}$ ” (а) и “возраст, млн лет –  $\epsilon\text{Hf}(T)$ ” (б). Поля составов – по [9]. 8 – кварцевый латит, обр. 8; 17– кварцевый монцонит, обр. 17. Пунктиром на нижнем рисунке показаны тренды эволюции коры с возрастaми 3,0–3,3 млрд лет при  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,015$ .

ноионных литофильных элементов (K, Cs, Rb), PЗЭ и деплетированы относительно Nb, Ta, Ti, что наряду с преобладающими отрицательными значениями  $\epsilon\text{Nd}(T)$  в породе и  $\epsilon\text{Hf}(T)$  в цирконе свидетельствует о происхождении исходных магм главным образом за счёт плавления пород коры. В то же время присутствие мантийного компонента в породах ассоциации определяется положительными значениями  $\epsilon\text{Nd}(T)$  и  $\epsilon\text{Hf}(T)$  в части образцов пород и кристаллов циркона.

Гранитоиды АЛМГ пространственно совмещены с неоархейскими породами основного состава. В пределах Кейвской структуры догранитные тела основных пород образуют рои даек и два крупных массива – Щучьезёрский и Цагинский, сложенные дифференцированным комплексом пород от габбро, габбро-норитов в краевых частях тел до лейкогаббро, лабрадоритов и габбро-лабрадоритов в их центральных частях. Жильные тела монцонитов, порфиroidных амфибол-биотитовых и эгирин-арфведсонитовых гранитов пересекают породы массивов, и в пределах ошибок определения U–Pb-ме-



**Рис. 2.** Диаграммы с результатами экспериментального плавления пород различного состава при разных РТ-условиях ([14] и ссылки в сообщении):  $\text{SiO}_2 - \text{F}$ , ( $\text{F} = 100 \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ , ат.%) (а),  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  (б). 1 – породы субвулканической фации (андезиты, латиты, кварцевые латиты, трахириодациты), 2–3 – гранитоиды гипабиссальной фации: 2 – кварцевые монцониты, кварцевые сиениты, 3 – жильный лейкогранит, 4 – субщелочные порфиroidные граниты мезоабиссальной фации глубинности.

тодом имеют близкое с ними время образования. Гранитоиды не входят в состав дифференцированного комплекса массивов основных пород, и пространственная совмещённость близких по составу пород кремнекислого и основного составов позволяет рассматривать последние лишь в качестве источников тепла, необходимого для плавления коры и возникновения кремнекислых расплавов. Последние наряду с “коровыми” изотопными характеристиками могли иметь повышенные концентрации радиогенных изотопов Nd и Hf, унаследованные от расплавов основного состава, вызывавших плавление пород коры.

Изучение петрохимических особенностей пород АЛМГ показало их принадлежность главным образом к производным метаглинозёмистого типа. Согласно экспериментальным данным [11, 12], в качестве источников метаглинозёмистых кислых магм мало вероятны породы кремнекислого и среднего составов, поскольку при всех степенях их парциального плавления полученные расплавы

являются перглинозёмистыми и пересыщены алюминиём относительно кальция и щелочей. Расплавы, имевшие источниками коровые породы основного состава, относятся главным образом к метаглинозёмистым и имеют повышенную железистость (>60%, [13]). Железистость метаэффузивов и гранитоидов АЛМГ находится в пределах 69–97%, что наряду с повышенной концентрацией в них SiO<sub>2</sub> и щелочей позволяет предполагать близость составов изученных пород и производных парциального плавления средне- и высококальциевых пород базальтового состава (рис. 2а, 2б). По экспериментальным данным плавление таких пород, содержащих умеренное количество воды (1,7–2,3%), происходит при  $T = 825–950$  °C и  $P = 7$  Кбар [14]. Повышенные концентрации щелочей в подвергавшихся плавлению породах нижнего структурного яруса Кейвской структуры могли быть обусловлены процессом щелочного метасоматоза, происходившем в них до внедрения интрузий габбро-лабрадоритов и щелочных гранитов [15].

Таким образом результаты изучения изотопных Sm–Nd-, Lu–Hf-систем и петрохимических особенностей пород АЛМГ позволяют предполагать образование исходных магм ассоциации за счёт плавления метасоматически изменённых пород основного состава при внедрении в кору базитовых расплавов, исходных для пород дайкового комплекса и массивов габбро-лабрадоритов.

**Благодарности.** Авторы признательны Е.А. Белоусовой (Macquarie University, Sydney, Australia) и А.А. Кременецкому (ИМГРЭ, Москва) за анализы изотопного состава гафния в цирконе.

**Источники финансирования.** Исследования выполнены при поддержке РФФИ (гранты 17–35–50002, 16–05–00026а) и госконтракта № 13/17–1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blichert-Toft J., Arndt N.T., Ludden J.N. // *Lithos*. 1996. V. 37. P. 97–111.
2. Ветрин В.Р., Родионов Н.В. // *Петрология*. 2009. Т. 17. № 6. С. 578–600.
3. Eby G.N. // *Geology*. 1992. V. 20. P. 641–644.
4. Griffin W.L., Pearson N.J., Belousova E., Jackson S.E., O'Reilly S.Y., van Achterberg E., Shee S.R. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2000. V. 64. P. 133–147.
5. Литвиненко И.В., Анкудинов С.А., Платонок Л.Н., Синарова Ю.А. *Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита*. Л.: Наука, 1968. С. 104–110.
6. Guitreau M., Blichert-Toft J., Martin H., Mojzsis S.J., Albaredo F. // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2012. V. 337–338. P. 211–223.
7. Баянова Т.Б. *Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма*. СПб.: Наука, 2004. 174 с.
8. Vervoort J.D., Blichert-Toft J. // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1999. V. 63. P. 533–556.
9. Ветрин В.Р., Белоусова Е.А., Кременецкий А.А. // *Зап. РМО*. 2017. Ч. CXLVI. № 3. С. 1–16.
10. Bonin B. // *Lithos*. V. 78. 2004. P. 1–24.
11. Patiño Douce A.E. // *J. Petrol.* 2005. V. 46. P. 275–290.
12. Watkins J.M., Clemens J.D., Treloar P.J. // *Cont. Mineral. and Petrol.* 2007. V. 154.
13. Rapp R.P., Watson E.B. // *J. Petrol.* 1995. V. 36. P. 891–931.
14. Ferreira V.P., Sial A.N., Pimental M.M., Armstrong R., Guimarães I.P., Filho A. F. da Silva, Lima M.M.C., da Silva T.R. // *Lithos*. 2015. V. 232. P. 150–161.
15. Белолупецкий А.П., Гаскельберг В.Г., Гаскельберг Л.А., Антонюк Е.С., Ильин Ю.И. *Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова*. Л.: Наука, 1980. 240 с.

## SOURCES OF MATTER FOR NEOARCHAEOAN SUBALKALINE MAGMATIC ROCKS OF THE KEIVY STRUCTURE (KOLA PENINSULA)

V. R. Vetrin

*Geological Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk region, Russian Federation  
Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS L.N. Kogarko April 24, 2019

Received April 24, 2019

The Neoproterozoic subalkaline magmatism of Keivy structure is expressed in formation of the volcano-plutonic association of latite-monzonite-granite (ALMG). The quantity of the measured relation <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd in rocks is determined in 0.511061–0.511365, and values of model age are located in an interval from 3.14 to 3.21 billion years at εNd (2670) from 2.2 to -1.3. The initial relations <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf in zircon are in limits 0.280950–0.281069, and figurative points of composition form the field around a trend of the CHUR. According to the isotope and geochemical data for all rocks the basic composition of protholites is supposed. In quantity εHf(T) points of zircon are localized in the field of the development of the crust with <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf = 0.015 and 3.0–3.3 billion years age. It probably demonstrates the formation of initial melts mainly at the expense of matrix with a long time of stay in crust. The formation of ALMG magmas is assumed to appear due to the melting of metasomatically altered rocks of the lower crust during intrusion of basaltic melts initial for the rocks of the dike complex and the gabbro-labradorite massifs into the upper crust.

**Keywords:** Neoproterozoic subalkaline rocks, Sm-Nd, Lu-Hf isotope systems, petrology, Kola Peninsula.