

УДК 552.32.6(470.21)

## ПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ПРОЦЕССЫ МАНТИЙНО-КОРОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В АРХЕЙСКОМ ФУНДАМЕНТЕ ПЕЧЕНГСКОГО ПАЛЕОРИФТА

© 2003 г. В. Р. Ветрин, А. А. Деленицин

Представлено академиком О.А. Богатиковым 16.01.2003 г.

Поступило 05.11.2002 г.

Формирование континентальных рифтов сопровождалось деструкцией сиалического фундамента и внедрением в верхнюю кору огромных объемов основных–ультраосновных расплавов, разнообразие которых зависело от состава астеносферного источника, глубины генерации магм и мощности земной коры. В небольшом количестве среди магматических пород рифтов присутствуют дациты, риолиты и их интрузивные эквиваленты, образование которых связывается с участием в петрогенезисе вещества верхних частей литосферы.

Благоприятным объектом для исследования процессов мантийно-корового взаимодействия при формировании Печенгского палеорифта, расположенного в северной части Балтийского щита, являются архейские породы его фундамента, вскрытые разрезом Кольской сверхглубокой скважины (КСГС) на глубинах 6842–12261 м. В отличие от приповерхностных ассоциаций породы архейского комплекса КСГС интенсивно изменены процессами протерозойского магматизма и метасоматоза, связанными с формированием Печенгской структуры. К их числу относятся: внедрение многочисленных тел основного состава, регрессивный метаморфизм и гранитизация пород, а также образование интрузивных тел постскладчатых гранитов.

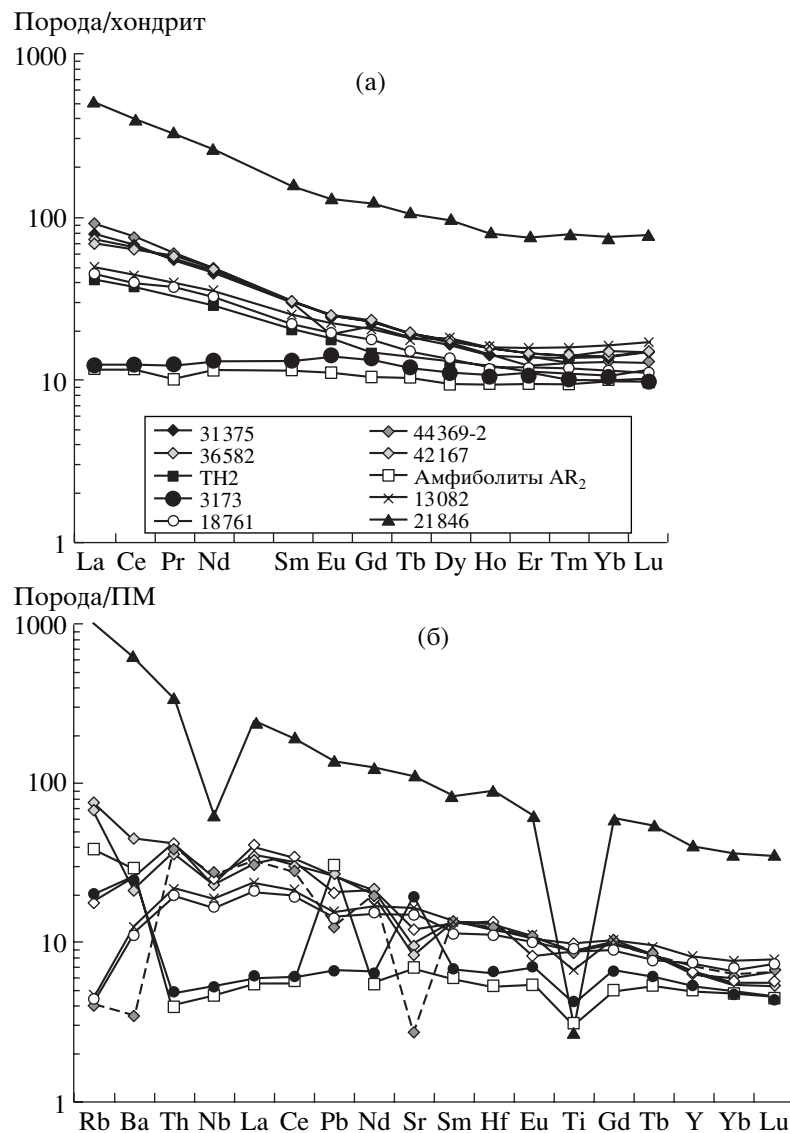
**А м ф и б о л и т ы.** Породы основного состава, представленные в настоящее время разнообразными амфиболитами, составляют около 30% объема архейского комплекса КСГС. Их преобладающая часть ( $\geq 80\%$ ) относится к породам дайковой фации, которыми были образованы, вероятно, подводящие каналы для эффузивов Печенги. Эволюция состава последних определялась сменной андезито-базальтов, трахиандезито-базальтов и трахибазальтов (маярвинская и пирттияр-

винская свиты) толеитовыми базальтами, базальтами и ферропикрит-базальтами заполярнинской и матерской свит [1].

По нормативному составу амфиболиты дайковой фации соответствуют оливиновым или кварцевым толеитам с умеренно фракционированным распределением РЗЭ при повышенном содержании легких лантаноидов ( $(La/Yb)_n = 4.6-6.9$ , рис. 1). От обогащенных редкоземельными элементами базальтов ТН2 архейских зеленокаменных поясов [2] породы дайковой фации отличаются более высокими содержаниями РЗЭ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ , V и пониженными концентрациями MgO и Cr. Среди метаэффузивов Печенги по содержанию РЗЭ и других редких элементов наиболее сходный состав с амфиболитами КСГС имеют меланократовые базальты заполярнинской свиты и трахибазальты пирттиярвинской свиты. В то же время последние характеризуются повышенными концентрациями  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  и пониженными – CaO и MgO при близких с амфиболитами содержаниях  $SiO_2$ , что противоречит предположению о происхождении изученных амфиболитов дайковой фации и базальтов пирттиярвинской свиты при дифференциации единого расплава. Наиболее сходны по составу с амфиболитами КСГС базальты заполярнинской свиты, сформировавшиеся из относительно малоглубинного деплетированного мантийного источника с возрастом около 2.1 млрд. лет [1].

Архейские амфиболиты обрамления скважины и аналогичные породы в разрезе КСГС по нормативному составу соответствуют главным образом оливиновым толеитам и в меньшем количестве – щелочным базальтам и кварцевым толеитам. Амфиболиты характеризуются пониженными концентрациями легких лантаноидов и пологим распределением РЗЭ ( $(La/Yb)_n = 0.7-2.0$ ), чем резко отличаются от протерозойских амфиболитов в архейском комплексе КСГС, но сходны с ТН1 – наиболее распространенными базальтами архейских зеленокаменных поясов [2] и с толеитовыми базальтами современных зон субдукции

Геологический институт Кольского научного центра  
Российской Академии наук,  
Апатиты Мурманской обл.

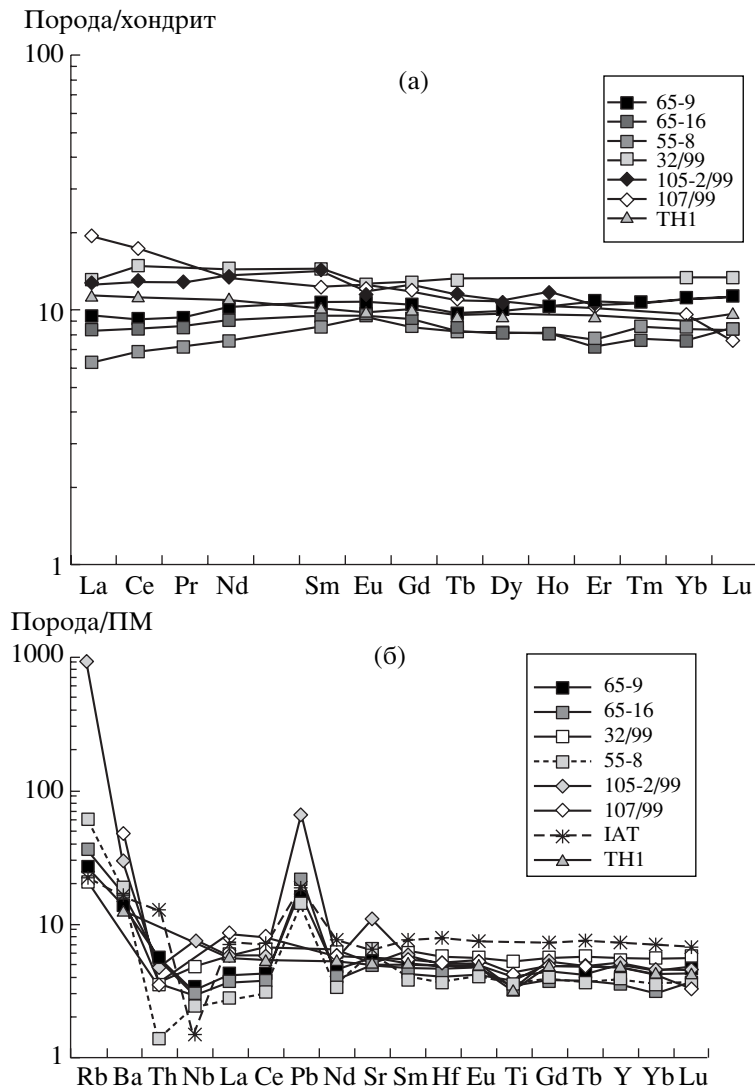


**Рис. 1.** Нормированные к хондриту (а) и примитивной мантии (б) концентрации РЗЭ и редких элементов в амфиболитах дайковой фации КСГС (обр. 31375, 36582, 44369-2, 42167). TH2 – толеиты архейских зеленокаменных поясов [2], амфиболиты AR<sub>2</sub> – средний состав амфиболитов окружения скважины. Обр. 3173, 13082, 18761, 21846 – базальты соответственно матертской, заполярнинской, пирттиярвинской и маярвинской свит Печенгской структуры. ПМ – примитивная мантия.

[3]. Исключение составляют амфиболиты обр. 107/99 и 105-2/99, обогащенные легкими РЗЭ, Rb, Ba, Pb и Sr (рис. 2), что является, скорее всего, результатом их интенсивной гранитизации (K<sub>2</sub>O 3.2–5.4%, SiO<sub>2</sub> до 51.3%).

Сходство эффузивов палеопротерозойской Печенгской структуры с амфиболитами из архейского комплекса КСГС, выявленное при сравнении составов этих пород, подтверждается и при изучении в них Sm–Nd-изотопной системы. Модельный возраст амфиболитов, вычисленный исходя из предположения о деплетированном составе мантии региона ( $T_{Nd}(DM)$ ), составляет 2.16–2.33 млрд. лет (табл. 1), чем определяется нижний

возрастной предел образования протолитов. Учитывая сходство составов рассматриваемых амфиболитов с metabазальтами заполярнинской свиты Печенги, время образования которых оценивается в  $2114 \pm 52$  млн. лет [4], такой же возраст мы принимаем и для проанализированных амфиболитов. Величина  $\epsilon_{Nd(2114)}$  в амфиболитах составляет 0.77–2.69, что приближается или ниже значения  $\epsilon_{Nd} \sim 3.5$  для деплетированной мантии с возрастом 2.1 млрд. лет [5]. Близкие значения  $\epsilon_{Nd}$  (0.70–2.77) установлены и для образцов метапироксениста и метагаббро, аналогичных породам дайковых комплексов из обрамления Печенги с возрастными



**Рис. 2.** Нормированные к хондриту (а) и примитивной мантии (б) концентрации редких элементов в амфиболитах окрестности скважины. TH1 – толеиты архейских зеленокаменных поясов [2]. IAT – толеитовые базальты островной дуги Южных Сандвичевых островов [3].

соответственно 1956 и 2200 млн. лет [4]. Интерпретация пониженных значений  $\epsilon_{Nd}$  обычно производится исходя из предположения об обогащенной природе источника, либо вследствие контаминации расплавов веществом верхней коры [6]. Последнему варианту противоречат пониженные концентрации Rb, Ba, Pb в базальтах заполярной свиты. Следовательно, вычисленные значения  $\epsilon_{Nd}$  отражают, скорее всего, формирование исходных расплавов из деплетированных мантийных источников, в различной степени обогащенных некогерентными элементами.

Амфиболиты окружения скважины имели деплетированный или сильно деплетированный ( $\epsilon_{Nd} = 2.15-3.3$ ) состав источника для возраста 2.84 млрд. лет (см. табл. 1). Отрицательное значение  $\epsilon_{Nd}$  (-0.48) для обр. 105-2/99 обусловлено, вероят-

но, нарушением Sm–Nd-изотопной системы в процессе калиевого метасоматоза пород.

**Метаморфизм и гранитизация.** Процесс протерозойской гранитизации по времени был близок с регрессивным метаморфизмом амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций. Гранитизация проявлена локально лишь под Печенгским палеорифтом и в его ближайшем окружении и по отношению к вмещающим метаморфическим породам представляла собой резко неравновесный и неизохимический процесс, сопровождавшийся выносом  $Al_2O_3$ , CaO,  $Na_2O$  и привносом  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , FeO,  $K_2O$  и ряда элементов примесей (Rb, Ba, Nb, Zr, РЗЭ, Pb, Cu, Cr, Ni, Co, V, F, Pb,  $CO_2$ ), характерных для пород повышенной щелочности. Изучение изотопного состава нерадиогенного свинца в породах и минера-

**Таблица 1.** Sm–Nd-изотопные данные для амфиболитов КСГС и амфиболитов и гранитов окружения скважины

№ обр.	Объект, породы	[Sm], ppm	[Nd], ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$T(\text{DM})$ , млн. лет	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{DM})$	$T$ , млн. лет
44369-2	КСГС, породы дайковой фации	4.7	22.56	0.12605	$0.511695 \pm 4$	2334	0.77	2114
42167		5.6	26.90	0.12582	$0.511790 \pm 9$	2160	2.69	2114
31375		5.32	25.37	0.12683	$0.511775 \pm 3$	2212	2.12	2114
43745	КСГС, метагаббро	2.67	14.17	0.11407	$0.511583 \pm 4$	2222	2.77	2200
9608	КСГС, метапироксенит	6.69	32.92	0.12283	$0.511724 \pm 4$	2200	0.7	1956
55-8	Амфиболиты окружения скважины	1.66	4.87	0.20591	$0.512922 \pm 38$		2.15	2840
65-9		2.04	6.10	0.20272	$0.512920 \pm 6$		3.29	2840
105-2		2.35	7.14	0.19883	$0.512655 \pm 16$		-0.48	2825
1/99	Жильный гранит	28.44	227.376	0.075597	$0.510822 \pm 7$	2442	-8.10	1762
2/99	Порфирированный гранит	11.03	87.302	0.076405	$0.510849 \pm 5$	2426	-7.60	1772

Примечание. Измерения выполнены на масс-спектрометре "Finnigan MAT-262". Значение стандартов La Jolla  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511833 \pm 6$  ( $n = 11$ ) и JNd1 =  $0.512078 \pm 5$  ( $n = 10$ ). Вычисления  $T(\text{DM})$  произведены в соответствии с моделью Де Паоло [5]. Модельный возраст для обр. 55-8 и 65-9 и 105-2 не рассчитан из-за повышенных значений  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ , вследствие чего погрешности оценок  $T(\text{DM})$  многократно возрастают.  $T$  – значения возраста по данным U–Pb- и Rb–Sr-методов, принятые при вычислении  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{DM})$ .

лах мигматитов указывает на смешение древнего Pb (с возрастом 2.8 млрд. лет), развивавшегося при низких U/Pb- и высоких Th/U-отношениях в области нижней коры, с более молодым Pb (~2.2 млрд. лет) мантийного генезиса, эволюция которого проходила при более высоких U/Pb- и более низких Th/U-отношениях [7]. Образование гранитизированных пород предполагается при воздействии на гнейсы и амфиболиты верхней коры глубинных флюидов, отделившихся при кристаллизации очагов мантийных расплавов, продуцировавших субщелочные вулканы пиритгарвинской свиты с возрастом 2.3–2.2 млрд. лет. Потоки флюидов, направленные из кристаллизующейся магмы в кровлю очага, вызывали процессы гранитизации пород верхней коры, обусловленные осаждением из флюидов главных и второстепенных компонентов в результате падения их растворимости при уменьшении температуры и давления. Возраст гранитизированных пород оценивается в 2225–2150 млн. лет, и продолжительность процесса гранитизации – в 50–70 млн. лет [7].

Постскладчатые граниты. На глубине 9100–11 200 м в породах архейского комплекса КСГС располагаются многочисленные дайковые тела мелкозернистых гранитов мощностью от первых сантиметров до 10–15 м, по составу аналогичные порфирированным гранитам 4-й фазы Личко-арагубского комплекса, образующим цепь посторогенных интрузивных тел в восточном обрамлении Печенги. Конкордантный U–Pb-возраст цирконов из мелкозернистых гранитов с глубин 9100–9700 м установлен в  $1765 \pm 2$  млн. лет [1], и

$\epsilon_{\text{Nd}(1765)}$  для этого образца составляет  $-11.0$  [8]. Повышенные отрицательные значения  $\epsilon_{\text{Nd}}$  ( $-7.6$ – $-8.1$ ) определены и для образцов гранитов с поверхности (см. табл. 1), что может свидетельствовать о существенном вкладе вещества коры в процесс образования расплавов. В то же время при изучении изотопного состава гелия установлено присутствие мантийной составляющей во флюидной фазе гранитоидов. Величина первичного отношения  $^4\text{He}/^3\text{He}$  в составе гелия, захваченного при кристаллизации пород, оценивается в  $\sim(3-5) \cdot 10^5$ . Генетическая интерпретация первичного отношения  $^4\text{He}/^3\text{He}$  проведена в рамках смешения гелия континентальной коры и мантийного гелия, за источник которого на основании результатов изучения глубинных ксенолитов принята обогащенная мантия региона. Так как величина отношения  $^4\text{He}/^3\text{He}$  в обогащенной мантии и континентальной коре принята соответственно как  $6.7 \cdot 10^4$  и  $1 \cdot 10^8$ , величина  $^4\text{He}/^3\text{He} = (3-5) \cdot 10^5$  в гранитах могла быть получена при смешивании мантийного и корового компонентов в пропорции  $\sim 1 : (4-7)$ . Эти данные определяют мантийно-коровую природу захваченного флюида, в составе которого мантийный компонент составляет  $\sim 13$ – $22\%$  [9]. Мантийно-коровая модель происхождения флюида в рассматриваемых гранитоидах хорошо соотносится с петрологической моделью происхождения этих пород, основу которой составляет процесс анатектического плавления коры под воздействием расплавов мантийного генезиса [10].

Таким образом, для большинства протерозойских процессов, проявленных в породах фундамента Печенгского палеорифта, установлена связь с мантийными источниками. Количество протерозойского вещества в архейских породах основания скважины вместе с ремобилизованным материалом архейской коры оценивается как  $\geq 30\%$  (амфиболиты  $\geq 12-15\%$ , жильные граниты  $\sim 3\%$ , гранитизированные породы  $\sim 15\%$ ).

Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 99-05-65158, 00-05-73032, 01-05-64671, 02-05-64394) и INTAS 01-0314.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования / Под ред. В.П. Орлова, Н.П. Лаврова. М.: МФ "Технонефтегаз", 1998.
2. *Condie K.C.* Archean Greenstone Belts. Amsterdam: Elsevier, 1981.
3. *Pearce J.A., Peate D.W.* // Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 1995. V. 23. P. 251-285.
4. *Смолькин В.Ф., Митрофанов Ф.П., Аведисян А.А. и др.* Магматизм, седиментогенез и геодинамика Печенгской палеорифтогенной структуры. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995.
5. *De Paolo D.J.* // Nature. 1981. V. 291. P. 193-196.
6. *Faure G.* Principles of Isotope Geology. N. Y.: Wiley, 1986.
7. *Ветрин В.Р., Гороховский Б.В.* // Петрология. 2002. № 2. С. 210-224.
8. *Timmerman M.J., Daly J.S.* // Precamb. Res. 1995. V. 72. P. 97-107.
9. *Ветрин В.Р., Каменский И.Л., Икорский С.В.* // Петрология. 2002. № 3. С. 270-282.
10. *Ветрин В.Р., Виноградов А.Н., Виноградова Г.В.* В кн.: Интрузивные чарнокиты и порфиroidные граниты Кольского полуострова. Апатиты: Изд-во КФАН СССР, 1975. С. 149-316.