

# Эволюция мантийного субстрата САХ, 14–16° с.ш. и 33°40' с.ш.: временные и вещественные ограничения процессов аккреции океанической литосферы по данным исследования Sm-Nd изотопной системы

С. А. Силантьев, С. Ф. Карпенко

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН

Б. В. Беляцкий

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН

**Аннотация.** Объектом исследования являлись ультраосновные породы, отобранные в двух районах гребневой зоны Срединно-Атлантического хребта (САХ): 1) 13–17° с.ш. (вблизи пересечения оси хребта с разломной зоной 15°20'); и 2) 33°40' с.ш. (западное пересечения гребня САХ и разлома Хэйс). В 24 образцах перидотитов и ассоциирующих с ними плутонических и вулканических пород были измерены величины отношений Sm/Nd,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ , которые позволили расчетными методами протестировать временные и генетические связи между эволюцией мантийного вещества под гребнем хребта и продуктами его магматизма. Установлено повсеместно проявленное несоответствие в оценках степени плавления экстремально деплетированных мантийных перидотитов САХ между 14 и 16° с.ш., полученных петрологическими и геохимическими методами. Это несоответствие указывает на широкомасштабное взаимодействие мантийного субстрата с обогащенными несовместимыми элементами магматическими расплавами или флюидами. Полученные данные позволяют допускать, что неоднократное плавление мантии под осевой зоной САХ является универсальной чертой магматизма низкоскоростных спрединговых центров. Результаты проведенного исследования показали, что в Центральной Атлантике, под гребневой зоной САХ, существуют отчетливые признаки изотопно-геохимической сегментации мантии. Предполагается, что аномальные в геохимическом отношении мантийные перидотиты САХ в зонах его пересечения с разломом 15°20' относятся к фрагментам мантийного субстрата, чужеродного для мантии под Атлантикой к северу от экватора.

## 1. Введение

Объектами настоящего исследования служили ультраосновные породы, драгированные в 12-ом и 16-ом рейсах НИС “Академик Борис Петров” в двух районах гребневой зоны Срединно-Атлантического хребта (САХ): 1) 13–17° с.ш. (вблизи пересечения оси хребта с разломной зоной 15°20'); и 2) 33°40' с.ш. (западное пересечения гребня САХ и разлома Хэйс).

Были изучены также образцы мантийных перидотитов, отобранных в бортах рифтовой долины сегментов САХ между 13 и 17° с.ш. с борта глубоководного автономного аппарата “Nautile” в экспедиции НИС “L'Atalante” в рамках проекта FARA.

Район гребневой зоны САХ между 13 и 17° с.ш. является уникальным объектом для изучения вещественного состава мантии и его связей с геохимическими параметрами продуктов современного магматизма в низкоскоростных центрах спрединга по следующим причинам: 1) широкое развитие здесь протяженных обнажений реститогенных перидотитов; 2) совмещение в районе разломной зоны 15°20' двух контрастных по характеру магматизма сегментов хребта: нормального – к северу и аномального

©2000 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE00042.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 5 января 2001.  
URL: <http://eos.wdcb.ru/rjes/v03/RJE00042/RJE00042.htm>

– к югу; 3) ярко выраженная в аномальном (южном) сегменте САХ (14°48' с.ш.) резкоградиентная геохимическая аномалия, установленная по развитию здесь базальтоидов плюмового типа; 4) наличие накопленного к настоящему времени большого объема данных по минералогии и геохимии мантийных реститов этого района.

Предпринятые ранее попытки интерпретации данных по изотопному составу Pb, Sr и Nd в мантийных перидотитах САХ из района его пересечения с разломной зоной 15°20' были ориентированы на тестирование генетических связей между ассоциирующими породами перидотит-габбро-базальтовой ассоциации [Silant'ev et al., 1995a], а также на идентификацию геохимических типов мантийного субстрата под гребневой зоной САХ между 13 и 17° с.ш. и оценку влияния на его изотопные характеристики экзогенных факторов [Силантьев, Беляцкий, 1998; Silant'ev et al., 1998]. На основании изотопных данных в указанных выше работах было высказано предположение, что в гребневой зоне САХ между 14 и 16° с.ш. присутствуют и тесно ассоциируют три главных геохимических типа представителей мантийного вещества: 1) предельно деплетированные перидотиты из дунит-гарцбургитовой ассоциации; 2) умеренно деплетированные гарцбургиты, в изотопном отношении близкие к мантийному веществу, обогащенному компонентом NiMU; 3) флогопитовые дуниты, генетически не связанные с продуктами современного магматизма САХ и близкие по геохимическим параметрам к веществу древней субконтинентальной мантии.

Геохимическая информация о мантийных породах сегмента САХ, заключенного между 30 и 34° с.ш. (в нашем случае из западного пересечения САХ и разлома Хэйс), имеет принципиальное значение для выяснения характера вещественной сегментации гребня хребта в районе южной периферии области развития магматизма, связанного с Азорским мегаплюмом. Следует заметить, что сведения о вещественном составе перидотитов из этого района САХ крайне скудны, а данные по изотопной геохимии этих пород до настоящего времени отсутствовали. В [Silant'ev et al., 1995b] высказано предположение, что в западном пересечении САХ и разлома Хэйс присутствуют два типа ультраосновных пород, один из которых представлен амфиболлизированными мантийными реститами, другой – амфиболитами, развитыми по ультраосновным кумулатам расслоенного комплекса. Альтернативная интерпретация происхождения перидотитов, относящихся ко второму из упомянутых выше типов, предложена в [Bazylev, 1997] и подразумевает происхождение этих ультраосновных амфиболитов за счет контактово-метасоматической перекристал-

лизации мантийных реститов при участии коровых флюидов, обеспечивающих привнос в эти породы кремнезема и железа. Анализ распределения различных по степени деплетированности мантийных реститов вдоль простирания гребня САХ между 30 и 37° с.ш. позволил рассматривать разломную зону Хэйс как южную границу между аномальным северным плюмовым сегментом САХ (Азорский мегаплюм) и южным, характеризующимся нормальным спредингковым магматизмом [Bazylev, 1997]. Тектоническая позиция мантийных перидотитов САХ между 33°43' и 34°07' с.ш. обсуждается в [Gracia et al., 1998], где рассмотрена связь распределения вдоль простирания хребта в этом регионе сегментов с различным магматическим бюджетом и пространственным положением обнажений ультраосновных пород.

Все многообразие минеральных типов ультраосновных пород, присутствующих в гребневой зоне САХ между 13–17° с.ш. и на 33°40' с.ш., в настоящее время аттестовано в отношении изотопных характеристик Sm-Nd системы (табл. 1). Эти изотопные характеристики позволили расчетными методами протестировать временные и генетические связи между эволюцией мантийного вещества под гребнем хребта и продуктами его магматизма.

## 2. Петрографические типы изученных пород

### 2.1. Северный сегмент САХ (15°20'–16° с.ш.)

В восточном борту рифтовой долины изученные мантийные перидотиты представлены следующими породами: станция FR12 – массивный серпентинит с характерной пластинчатой структурой серпентинового матрикса, в который включены мелкие ксеноморфные выделения шпинели (обр. FR12-04). С шпинелью тесно ассоциируют, образуя сростания, мелкие чешуйки бурого флогопита. Минеральный состав перидотитов станции FR12, так же как состав шпинели в них ( $Cr\# = 0,598$ ), позволяет относить эти породы к флогопит-содержащим дунитам. Кроме перидотитов на этой станции присутствуют нормальные (офитовые) (обр. FR12-02) и гнейсовидные габбро (обр. FR12-05), в которых, как и в ассоциирующих перидотитах, обнаружен биотит, а также подчиненные афировые базальты, состоящие из плагиоклаза и клинопироксена (обр. FR12-11). На станции FR23, расположенной немного к югу от станции FR12, перидотиты представлены типичными шпинелевыми гарцбургитами (обр. FR23-01), которые ассоциируют с долеритами (обр. FR23-11).

В западном борту рифтовой долины были изучены породы, отобранные на трех расположенных вблизи

**Таблица 1.** Изотопный состав Sm и Nd в мантийных реститах Центральной Атлантики и в ассоциирующих плутонических и вулканических породах

№ образца	Тип породы	Район опробования	Sm/Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd
16ABP56-39	Гарцбургит	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ЗБРД	0,256	0,512992 ±18	0,1556
16ABP56-76	Гарцбургит	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ЗБРД	0,297	0,51325 ±34	0,1807
16ABP56-99	Гарцбургит	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ЗБРД	0,282	0,513096 ±155	0,1725
16ABP56-90	Гнейсовидный габбро	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ЗБРД	0,373	0,513022 ±12	0,2260
F16-07	Гарцбургит	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ЗБРД	0,154	0,512921 ±27	0,0936
F12-04	Флогопитовый дунит	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ВБРД	0,217	0,512142 ±16	0,1315
F12-05	Гнейсовидное габбро с Биотитом	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ВБРД	0,319	0,513214 ±18	0,1935
F12-02	Нормальный габбро	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ВБРД	0,409	0,513044 ±16	0,2478
F12-11	Афировый базальт	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ВБРД	0,304	0,513144 ±8	0,1845
F23-01	Гарцбургит	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ВБРД	0,125	0,512996 ±24	0,0701
F23-11	Долерит	Сегмент САХ к северу от разлома 15°20', ВБРД	0,312	0,513043 ±25	0,1895
F03-04b	Гарцбургит	Сегмент САХ к югу от разлома 15°20', ЮВУГ	0,290	0,513084 ±28	0,1754
F03-04a	Нормальный габбро	Сегмент САХ к югу от разлома 15°20', ЮВУГ	0,372	0,513238 ±21	0,2257
F03-02	Долерито-базальт	Сегмент САХ к югу от разлома 15°20', ЮВУГ	0,276	0,513001 ±9	0,1672
16ABP71-23	Дунит	Сегмент САХ к югу от разлома 15°20', ЮВУГ	0,177	0,512439 ±26	0,1034
16ABP71-71	Дунит	Сегмент САХ к югу от разлома 15°20', ЮВУГ	0,220	0,512334 ±21	0,1312
16ABP71-145	Гарцбургит	Сегмент САХ к югу от разлома 15°20', ЮВУГ	0,256	0,512422 ±26	0,1386
16ABP71-187	Гарцбургит	Сегмент САХ к югу от разлома 15°20', ЮВУГ	0,175	0,512387 ±24	0,1068
16ABP71-202	Брекчированный и карбонатизированный дунит	Сегмент САХ к югу от разлома 15°20', ЮВУГ	0,220	0,512459 ±13	0,1337
16ABP68-20	Гарцбургит	Сегмент САХ к югу от разлома 15°20', ЗБРД	0,219	0,512509 ±15	0,1327
16ABP75-50	Гарцбургит	Южный борт офсетной части разлома 15°20'	0,248	0,512454 ±17	0,1506
12ABP17-7	Гарцбургит	Поднятие в разломе 15°20' к востоку от его офсета	0,244	0,512954 ±44	0,1480
12ABP17-5	Гнейсовидный габбро	Поднятие в разломе 15°20' к востоку от его офсета	0,288	0,513061 ±11	0,1750
16ABP25-29	Метаперидотит	Западное пересечение САХ и разлома Хэйс, 33°40' с.ш.	0,584	0,513257 ±217	0,3532
16ABP25-4	Метаперидотит	Западное пересечение САХ и разлома Хэйс, 33°40' с.ш.	0,341	0,512579 ±114	0,2053
16ABP25-2	Метаперидотит	Западное пересечение САХ и разлома Хэйс, 33°40' с.ш.	0,384	0,513121 ±14	0,2325
16ABP25-1	Базитовый амфиболовый сланец	Западное пересечение САХ и разлома Хэйс, 33°40' с.ш.	0,290	0,513281 ±8	0,1760

друг от друга станциях: станция 16ABP56 (расположена практически напротив станции FR12, находящейся на восточном борту рифтовой долины) – интенсивно тектонизированные и рассланцованные шпинелевые гарцбургиты, в различной степени деплетированные, судя по составу реликтовой шпинели:  $Cr\# = 0,442$  (обр. 16ABP56-39),  $0,406$  (обр. 16ABP56-76),  $0,512$  (обр. 16ABP56-99). С этими породами ассоциируют гнейсовидные габброиды (обр. 16ABP56-90), идентичные обнаруженным на станции FR12. Отобранные на станции FR16 перидотиты характеризуются широким спектром структурных и минералогических особенностей и представлены как массивными шпинелевыми гарцбургитами (обр. FR16-07), так и в высокой степени гидротермально измененными брекчированными флогопитсодержащими перидотитами с обильными хлоритом и актинолитом. На той же станции были обнаружены нормальные и гнейсовидные габброиды с биотитом и секущие их жильные трондjemиты. На расположенной вблизи (к северу) станции FR22 отобранные перидотиты представлены карбонатизированными дунитами (обр. FR22-05) с признаками внедрения в них магматических расплавов основного состава (высокая степень изменения пород препятствует более точной их идентификации).

## 2.2. Южный сегмент САХ ( $14^{\circ}48' - 15^{\circ}10'$ с.ш.)

В западном борту рифтовой долины, в зоне ее пересечения с офсетом разлома  $15^{\circ}20'$ , расположено южное внутреннее угловое поднятие, известное тем, что в его пределах и к западу от него располагается массив ультраосновных пород, крупнейший из обнаруженных в современных океанических бассейнах и часто называемый “Диапир Буго” по имени Др. Анри Буго, первым из исследователей указавшим на присутствие в этом районе протяженных подводных обнажений мантийных перидотитов. Перидотиты из этого района характеризуются аномально высокой степенью деплетированности и относятся к дунит-гарцбургитовой ассоциации, характерной для всех станций опробования в этом участке САХ. На станции FR03 обнаружены как относительно умеренно серпентинизированные шпинелевые гарцбургиты, так и апогарцбургитовые серпентиниты, содержащие, возможно, нацело хлоритизированный плагиоклаз и многочисленные хлорит-актинолитовые прожилки (обр. FR03-04b). На той же станции в тесной ассоциации с гарцбургитами присутствуют аподунитовые серпентиниты. Кроме перидотитов на этой станции были отобраны нормальные габброиды (обр. FR03-04a) и долериты (обр. FR03-02). Вблизи от станции FR03, на станции 16ABP71, расположенной на плоской вершине упомянутого внутреннего углового поднятия, были драгированы в

различной степени карбонатизированные серпентиниты, представленные двумя группами, к первой из которых относятся баститовые апогарцбургитовые разности (обр. 16ABP71-145 и 16ABP71-187), а второй – соответствуют серпентинизированные дуниты (обр. 16ABP71-23, 16ABP71-71 и 16ABP71-202 – наиболее карбонатизированный и брекчированный серпентинит). Хромистость реликтовой шпинели в этих породах варьирует от  $0,492$  до  $0,606$  в гарцбургитах и от  $0,520$  до  $0,664$  в дунитах. Примечательно, что переход от дунитов к гарцбургитам часто фиксируется в масштабе одного образца.

К югу от внутреннего углового поднятия на станции 16ABP68, расположенной в том же, западном борту рифтовой долины, и наиболее приближенной из рассмотренных выше станций к пику геохимической аномалии  $14^{\circ}48'$ , отобраны умеренно карбонатизированные шпинелевые гарцбургиты (обр. 16ABP68-20) с признаками интрузивных контактов с секущими их тонкими габбровыми прожилками.

## 2.3. Трансформный разлом $15^{\circ}20'$

В офсете разлома  $15^{\circ}20'$  на станции 16ABP75, расположенной в южном борту трансформации и в 30 км к западу от южного внутреннего углового поднятия, обнаружены рассланцованные апогарцбургитовые серпентиниты (обр. 16ABP75-50), ассоциирующие с амфиболитизированными габбро. Вне офсета, к востоку от зоны его пересечения с САХ, мантийные рестины были драгированы на станции 12ABP17, в районе которой они представлены также шпинелевыми гарцбургитами (обр. 12ABP17-7). Гарцбургиты станции 12ABP17 по степени деплетированности близки к гарцбургитам станции 16ABP75: реститовая шпинель в перидотитах из этих районов характеризуется  $Cr\# = 0,505$  и  $0,522$ , соответственно. Кроме гарцбургитов на станции 12ABP17 были обнаружены интенсивно деформированные гнейсовидные габбро (обр. 12ABP17-5).

## 2.4. Пересечение САХ и разлома Хэйс

Перидотиты, отобранные с западного пересечения офсета разломной зоны Хэйс с САХ, представлены двумя петрографически различающимися группами: 1) массивными метагипербазитами, сложенными тальком, хлоритом, актинолитом, серпентином, шпинелью и магнетитом (обр. 16ABP25-2 и 16ABP25-4); 2) рассланцованными, часто полосчатыми ультраосновными амфиболитами с тальком и хлоритом (обр. 16ABP25-29). Эти перидотиты ассоциируют с роговообманковыми сланцами и актинолититами основного состава (обр. 16ABP25-1).

### 3. Методы аналитического исследования и получения расчетных возрастов.

Выбранные для анализа раздробленные пробы массой 500–700 мг (в случае габброидов и базальтов – 100–300 мг) предварительно промывались в течение 15 минут горячей разбавленной азотной кислотой. Затем пробы высушивались и истирались в агатовой ступке. К точно отмеренной навеске растертого материала добавлялся смешанный трасер  $^{146}\text{Nd}$ - $^{149}\text{Sm}$  и  $^{84}\text{Sr}$ - $^{85}\text{Rb}$ . После этого проба разлагалась в смеси  $\text{HF} + \text{HNO}_3$  при температуре  $120^\circ\text{C}$  в течение 2–5 дней. Все дальнейшие операции по выделению Rb, Sr, Sm и Nd производились по обычной методике, детально описанной в [Amelin and Semenov, 1996]. Измерения изотопного состава Sm и Nd выполнялись на 8-коллекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-261, работающем в статическом режиме, в лаборатории изотопной геохронологии и геохимии ИГГД РАН. Измеренные изотопные отношения неодима были нормализованы по отношению  $^{148}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,241570$  и затем пересчитаны на отношение  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в стандарте La Jolla = 0,511860. Точность определения отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ , характеризующая качество проведенного анализа (2 сигма), приведена в табл. 1. Точность определения величины отношения  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  принята равной 0,3%. Холостой опыт составлял 0,01 ng для Sm и 0,05 ng для Nd. Для стандарта BCR-1 в процессе проведения настоящего исследования были получены следующие результаты: Sm = 6,487 ppm, Nd = 28,45 ppm,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512663 \pm 9$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1383$ .

В целях изучения эволюции изотопного состава неодима в отобранных для исследования образцах кроме полученных аналитических данных были использованы известные зависимости между накоплением радиогенных изотопов в продуктах плавления мантийного субстрата и изотопным характером источника [Faure, 1986]. Такой подход позволил рассчитать тренды изменения изотопного состава неодима в изученных породах за последние 1–1,5 млрд лет. Базовой посылкой проведенных расчетов служило предположение, что точки пересечения линий изотопной эволюции позволяют судить о времени разделения мантийного субстрата на реститовую компоненту и отделившийся от него в результате плавления магматический расплав. С другой стороны, анализ расположения рассчитанных трендов изотопной эволюции относительно модельных линий эволюции изотопного состава Nd в CHUR и DM может дать полезную информацию, позволяющую в общих чертах охарактеризовать геохимическую при-

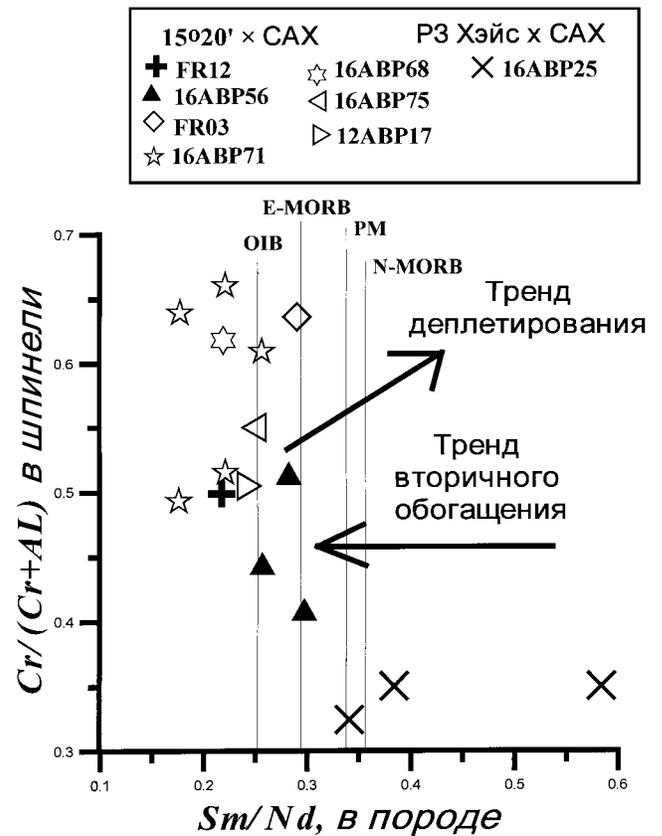


Рис. 1. Сопоставление степени деплетированности изученных мантийных перидотитов САХ, определенной по хромистости реститовой шпинели и величине отношения Sm/Nd в валовых пробах тех же пород. Уровни Sm/Nd в PM, N-MORB, E-MORB и OIB показаны по [Sun and McDonough, 1989].

роду мантийного вещества, представленного изученными перидотитами. Результаты произведенных по указанной методике расчетов графически отображены на рис. 5–12. Поскольку изученная коллекция образцов в достаточной мере аттестует многообразие минеральных типов мантийных реститов САХ между 13 и 17° с.ш., предпринятое исследование является первой попыткой оценить временные и вещественные ограничения мантийного диапиризма в нормальных и аномальных сегментах САХ, следующие из изотопных характеристик неодима в непосредственных представителях мантийного вещества.

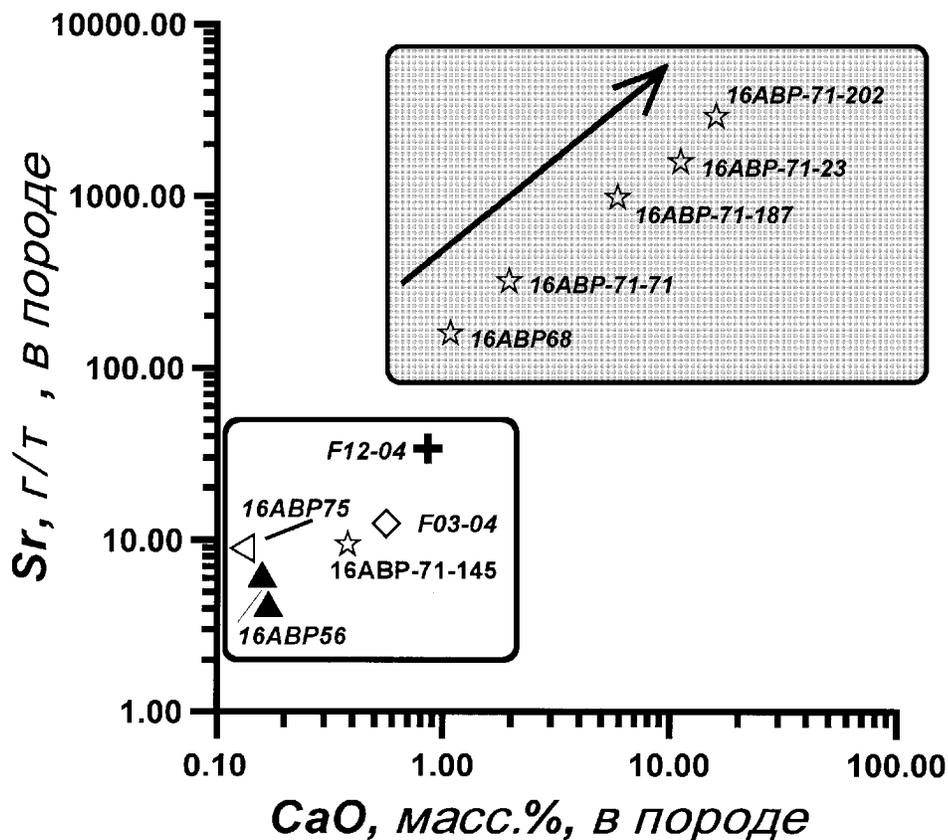


Рис. 2. Связь степени карбонатизации (показана стрелкой) серпентинитов САХ с содержанием в них Sr. Серым цветом обозначено поле карбонатизированных серпентинитов; поле серпентинитов не залито. Условные обозначения здесь и далее такие же, как на рис. 1.

#### 4. Эволюция мантийного вещества и ее связь с магматизмом САХ в районах 14–17° с.ш. и 33°40' с.ш.

В мантийных условиях поведение Sm и Nd в мантийных перидотитах очевидно определяется двумя главными эндогенными процессами: 1) частичным плавлением мантийного вещества и 2) взаимодействием мантийного субстрата с магматическими расплавами и его метасоматическим преобразованием в высокотемпературных флюидно-магматических системах. Степень частичного плавления определяет величину отношения Sm/Nd в мантийном рестите в соответствии с предпочтительным по сравнению с Sm концентрированием Nd в остаточных расплавах [Faure, 1986]. С другой стороны, повторное (наведенное) обогащение мантийного вещества в открытых магматических системах очевидно может приводить к существенным сдвигам величины отношения Sm/Nd в сторону его уменьшения. Наведенное

(относительно первичного значения Sm/Nd) обогащение мантийных реститов должно способствовать несоответствию в оценках степени деплетирования этих пород, полученных петрологическими (Cr# в реститовой шпинели) и геохимическими (Sm/Nd в породе) методами (рис. 1). Это несоответствие можно рассматривать как независимое свидетельство участия в частичном плавлении мантийного субстрата под САХ обогащенного магматического или флюидного компонента. Рис. 1 демонстрирует, что в некоторых экстремально деплетированных перидотитах САХ фиксируются очень низкие Sm/Nd отношения, которые отражают разнонаправленность трендов деплетирования мантийного субстрата при его частичном плавлении и наведенном (вторичном) обогащении за счет взаимодействия мантийного субстрата с магматическими расплавами.

Поскольку все кристаллические породы океанической коры в той или иной степени изменены в результате процессов метаморфизма или подводного

выветривания, отдельно следует рассмотреть проблему влияния экзогенных факторов на концентрации и изотопный состав Nd и Sm в океанических мантийных перидотитах. Так как концентрации самария и неодима в морской воде ничтожно малы: соответственно –  $0,545 \times 10^{-6}$  г/т и  $2,58 \times 10^{-6}$  г/т [Faure, 1986], можно полагать, что серпентинизация не приводит к привнесу этих элементов в океанические перидотиты. С другой стороны, если допускать участие в карбонатизации этих пород материала карбонатных осадков, в силу относительно высоких концентраций в известняках Sm и Nd: 2,03 и 8,75 г/т [Faure, 1986], нельзя исключить обогащения перидотитов этими лантаноидами при взаимодействии с низкотемпературными растворами, в которых растворено осадочное вещество. Существует возможность проверки влияния карбонатизации океанических перидотитов на концентрацию и изотопный состав Nd и Sm в этих породах, которая заключается в изучении возможных корреляций между распределением в проанализированных образцах Nd, Sm и Sr, так как для Sr установлен существенный привнос в океанические перидотиты как при карбонатизации, так и при серпентинизации [Силантьев, Беляцкий, 1998] (рис. 2). В почти целиком серпентинизированных океанических перидотитах величина отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в валовых пробах может соответствовать уровню этого отношения в морской воде или даже превышать его и, как показано в [Snow and Reisberg, 1995], является эффективным показателем степени серпентинизации океанических мантийных реститов. Согласно расчетам, проведенным в [Snow and Reisberg, 1995], величина W/R (отношение масс вода/порода), при которой происходила серпентинизация океанических перидотитов, во многих случаях превышала 10000. Отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в изученных мантийных реститах из зоны пересечения САХ и разлома  $15^{\circ}20'$  варьирует в пределах 0,7087–0,7097 (рис. 3). Исключением является образец F03-04b для которого  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  составляет 0,7047. Имеющиеся данные позволяют считать, что большая часть исследованных мантийных перидотитов была серпентинизирована при очень высоком W/R (не менее 100). С другой стороны, для образца F03-04b величина этого параметра не превышала 0,1. Наиболее поздним, следующим за серпентинизацией, низкотемпературным процессом перекристаллизации мантийных перидотитов является карбонатизация этих пород. Судя по вариациям величины  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , установленным для в различной степени карбонатизированных серпентинитов (образцы со станции 16ABP71), карбонатизация перидотитов происходила при том же W/R, что и их серпентинизация (рис. 3). С другой стороны, как видно из рис. 4, в различной степени карбонатизирован-

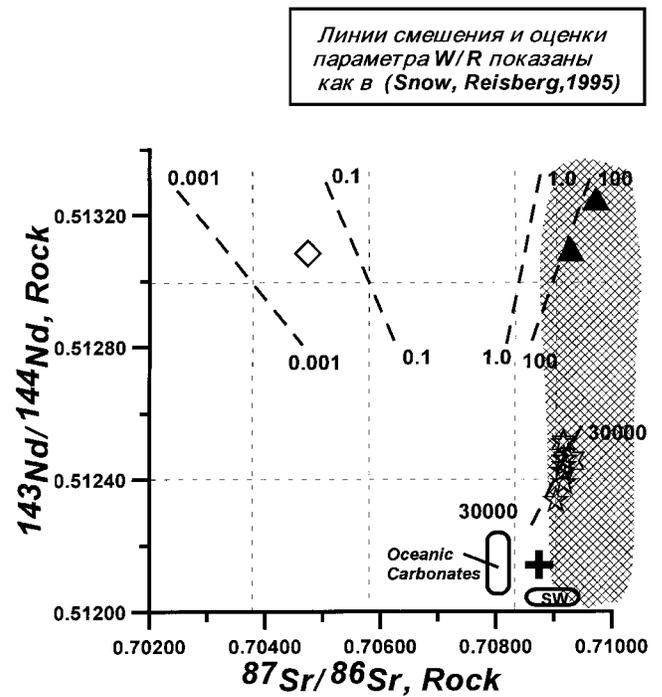


Рис. 3. Поле изотопных составов Sr и Nd изученных пород (заштриховано) на диаграмме  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для океанических перидотитов [Snow and Reisberg, 1995]. Изотопный состав морской воды и океанических карбонатных осадков показан по [Mason, 1966; O’Nions, 1987].

ные перидотиты станции 16ABP71 не обнаруживают значимых, сопряженных с высокими концентрациями стронция в этих породах, вариаций содержаний Sm и Nd. С другой стороны, ковариации между содержаниями Sm, Nd и Sr, соответствующие интервалу содержаний последнего до 10 г/т, возможно определяются первичными геохимическими характеристиками мантийных реститов. Изотопный состав Nd в изученных образцах, как следует из рис. 3, позволяет определенно подразделить их на две главные геохимические группы, изотопные характеристики которых не связаны с низкотемпературными вторичными процессами. Ранее, в [Faure, 1986] было предположено, что изотопный состав Nd в океанических базальтах испытывает изменения при их взаимодействии с морской водой только при  $W/R > 10^5$ . В то же время величина  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в абиссальных перидотитах, гидратированных при очень высоких отношениях W/R, судя по данным, приведенным в [Snow and Reisberg, 1995], близка к величине этого изотопного отношения в морской воде: 0,5120–0,5122. Вместе с тем, имеющиеся данные демонстрируют, что вариации отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в перидотитах, представленных образцами 16ABP-56 и

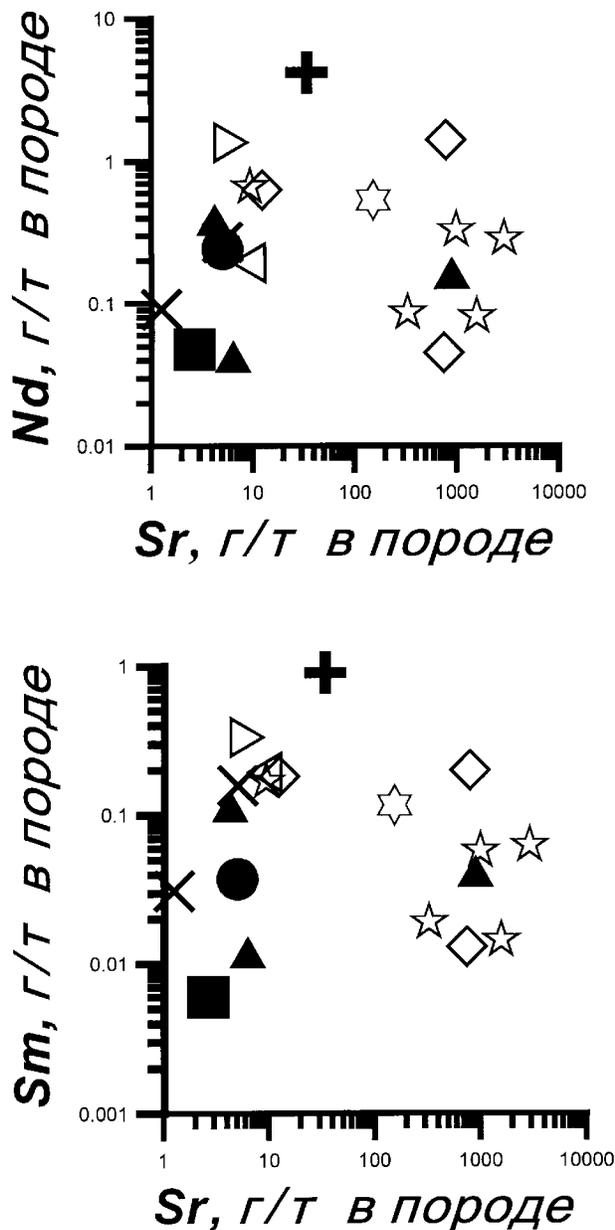


Рис. 4. Вариации содержаний Sr, Nd и Sm в изученных образцах мантийных реститов САХ.

16ABP56-99, не связаны со степенью их серпентинизации, поскольку эти породы изменены в одинаковой степени. Наряду с этим, экстремально низкая величина отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ , установленная в образце F12-04, навряд ли отражает воздействие на мантийный субстрат низкотемпературных экзогенных процессов, так как эта порода серпентинизирована не в большей степени, чем другие образцы, представленные в табл. 1, а ясно проявленные признаки карбонатизации в ней отсутствуют вовсе. Результаты экспериментов по кислотному выщелачи-

ванию проб многочисленных образцов MORB показали, что Sm/Nd отношение меняется (уменьшается) в этих породах не более, чем на 4% [Verma, 1992]. Серпентинизация океанических перидотитов происходит на тех же уровнях глубинности океанской коры и при тех же физико-химических условиях, что и изменения базальтового субстрата, поэтому представляется логичным предположить, что отмеченная выше высокая концентрация неодима в образце F12-04 отражает первичную геохимическую специфику протолита. Подобное предположение кажется тем более уместным в случае образца FR03-04b, серпентинизация которого происходила при низком W/R.

Все вышеизложенное позволяет предполагать, что приведенные в табл. 1 оценки величин отношений  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  и Sm/Nd можно с достаточной степенью надежности использовать в целях реконструкции геохимической природы мантийных источников под осевой зоной САХ, а также их возможной изотопной эволюции во времени и генетических связей с ассоциирующими продуктами магматизма.

#### 4.1. Северный сегмент САХ (15°20'–16° с.ш.)

Модельное датирование главных событий магматической эволюции мантийного субстрата, представленного образцом FR12-04, и сопоставление изотопных характеристик этого перидотита с таковыми в ассоциирующих габброидах и базальтах позволяет как и в [Silant'ev *et al.*, 1995a, 1995b] констатировать, что флогопитовый дунит со станции FR12 генетически не связан с комплексом магматических пород этого района восточного склона рифтовой долины. Этот перидотит, судя по его изотопным характеристикам, не имеет отношения к мантийным источникам типа DM, ответственным за происхождение родоначальных для MORB расплавов. Как следует из рис. 5, при предположении, что базальты этой станции комплементарны ассоциирующим перидотитам, следует допускать, что магматическое разделение этих пород произошло 1,2 млрд лет т.н. В случае комплементарности флогопитовому дуниту ассоциирующих с ним габброидов, возраст разделения продуктов плавления и мантийного рестита оказывается еще более неправдоподобно древним – 1,7 млрд лет. Характер модельной эволюции изотопных характеристик неодима в породах, составляющих магматический комплекс станции FR12, позволяет предполагать, что базальты (обр. FR12-11) и габброиды, представленные обр. FR12-05, были сформированы из магматических расплавов, отделившихся от мантии типа DM. С другой стороны, приведенные на рис. 5 данные указывают на возможность вещественной гетерогенности расплавов, при эволюции которых образовался плутонический

комплекс станции FR12, поскольку они могли различаться по степени деплетированности. При сопоставлении рассчитанных трендов эволюции изотопного состава неодима в изученных породах с трендами эволюции DM и CHUR можно прийти к выводу, что все представители магматического комплекса станции FR12 являются производными расплавов, отделившихся от источника DM, в то время как флогопитовый дунит относится к мантийному веществу, отделившемуся от CHUR 1,2 млрд лет т.н. и с тех пор не вовлекавшемуся в процесс плавления. Имея в виду характер наклона расчетных трендов для обр. FR12-05 (габбро) и FR12-11 (базальт) можно также предположить, что изотопные параметры этих пород отражают как минимум повторное плавление мантийного субстрата, уже отделившегося от CHUR, и не соответствуют канонической модели одноактной магматической сепарации EM и DM.

Отобранные в том же борту рифтовой долины, немного к югу от станции FR12, шпинелевые гарцбургиты (обр. FR23-01), являясь несомненным представителем DM, обнаруживают вместе с тем признаки обогащения ЛРЗЭ. Очевидно, это обогащение отражает воздействие на мантийное вещество процессов, напрямую не связанных с плавлением в мантийном источнике и заключающихся во взаимодействии расплава (или флюида) с вмещающим де-

плетированным мантийным субстратом. Ниже это повторное обогащение деплетированных мантийных рествитов ЛРЗЭ, проявленное в уменьшении отношения Sm/Nd, обозначается как “наведенное”. Долериты, ассоциирующие с гарцбургитами станции FR23, могли быть сформированы из расплавов, отделившихся от источника DM при модельном возрасте плавления 400 млн лет (рис. 6). С другой стороны, при допущении комплементарности долеритов и мантийных рествитов станции FR23 время отделения от источника, подобного FR23-01, расплава, родоначального для долеритов, можно оценивать как  $\leq 100$  млн лет.

Мантийные рествиты западного борта северного сегмента САХ по их изотопным характеристикам можно подразделить на две группы: 1) рествиты станции FR16 (обр. FR16-07) – более деплетированные по сравнению с перидотитами соседней станции 16ABP56, но одновременно с более ярко выраженным наведенным обогащением; 2) шпинелевые гарцбургиты станции 16ABP56 (обр. 16ABP56-39, 76 и 99), однотипные в изотопном отношении, характеризующиеся расчетными трендами эволюции изотопного состава, конформными модельному тренду эволюции DM, но также обнаруживающие признаки наведенного обогащения. Анализ данных, отображенных на рис. 7, дает основания для допущения, что мантийные перидотиты, представленные обр. FR16-07, могут являться представителями мантийного источника, продуцировавшего расплавы, родоначальные для базальтов (обр. FR12-11) и габброидов (обр. FR12-02 и 05) станции FR12, а также габбро со станции 16ABP56 (обр. 16ABP56-90). В последнем случае отделение расплава от мантийного источника должно было произойти 150–200 млн лет т.н. Следует заметить, что ни одна из двух выделенных в западном борту рифтовой долины северного сегмента САХ групп мантийных рествитов, судя по приведенным выше данным, не могла быть образована при одноактном плавлении, которое постулируется канонической моделью разделения CHUR на DM и EM [De Paolo and Wasserburg, 1976].

Из анализа приведенных данных вытекает предположение, что из всех рассмотренных выше мантийных перидотитов только породы, представленные обр. FR23-01 и FR16-07, могут являться претендентами на право считаться возможными представителями мантийного вещества, плавление которого обусловило генерацию расплавов, родоначальных для магматического комплекса сегмента САХ, расположенного к северу от разломной зоны  $15^{\circ}20'$ .

#### 4.2. Южный сегмент САХ ( $14^{\circ}48' - 15^{\circ}10'$ с.ш.)

Абсолютное большинство образцов мантийных перидотитов, отобранных в южном сегменте САХ

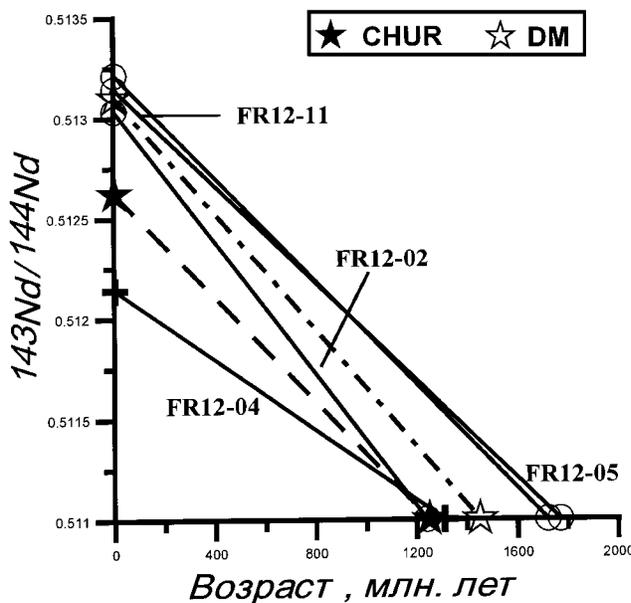


Рис. 5. Расчетные тренды эволюции во времени изотопного состава Nd в мантийных рествитах и ассоциирующих магматических породах станции FR12. Здесь и далее штрих-пунктирной линией обозначен модельный тренд эволюции DM, а пунктирной – CHUR (PM).

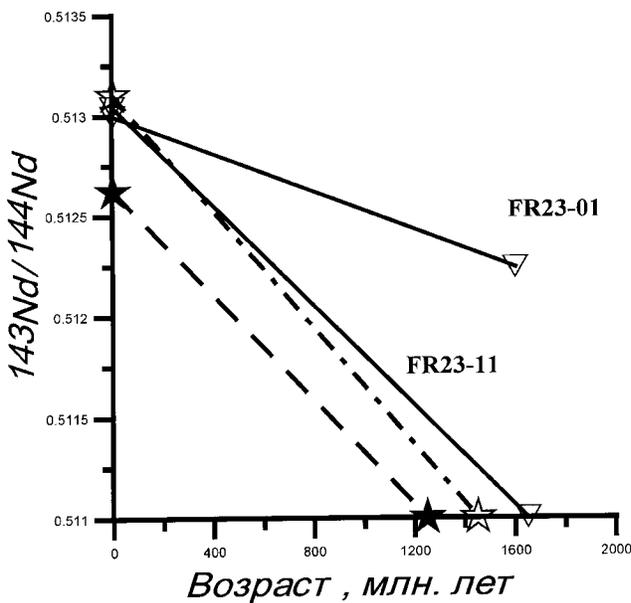


Рис. 6. Расчетные тренды эволюции во времени изотопного состава Nd в мантийных реститах и ассоциирующих магматических породах станции FR23.

в непосредственной близости от его пересечения с трансформным разломом, разительно отличаются в отношении изотопного состава неодима от перидотитов северного сегмента хребта. На станции 16ABP71 (внутреннее угловое поднятие) все образцы мантийных реститов независимо от их минерального состава и степени измененности характеризуются модельными трендами изотопной эволюции, группирующимися вблизи линии эволюции CHUR (или PM), и которые, судя по рис. 8, могут свидетельствовать об отделении этих реститов от резервуара CHUR около 500 млн лет т.н. Перидотиты станции 16ABP71 обнаруживают резко выраженные признаки наведенной обогащенности (низкие отношения Sm/Nd), а их эволюционные тренды в рассматриваемой системе координат имеют углы наклона, близкие к углу наклона тренда, характерного для аномального флогопитового дунита северного сегмента хребта (обр. FR12-04). Примечательно, что тесно ассоциирующие на станции 16ABP71 дуниты и гарцбургиты характеризуются близкими изотопными характеристиками, что возможно отражает генетическое родство этих пород.

В отличие от перидотитов станции 16ABP71, гарцбургит (обр. FR03-04b), отобранный на станции FR03, расположенной к юго-западу, в пределах того же внутреннего углового поднятия, в изотопном отношении близок к мантийным реститам северного сегмента САХ. Ассоциирующие с этим гарцбургитом

том долерито-базальты (обр. FR03-02) и габбро (обр. FR03-04a), как следует из рис. 9, в свою очередь идентичны породам магматического комплекса северного сегмента. По Sm/Nd отношению гарцбургит станции FR03 соответствует перидотитам, отобранным на станции 16ABP56 и, очевидно, что все сказанное выше о последних, может быть справедливым и для этого перидотита. В этой связи следует допускать, что как и в случае мантийных реститов северного сегмента САХ, гарцбургит, представленный обр. FR03-04b, не может рассматриваться как рестит от одноактного плавления источника типа DM и относится, возможно, к представителям мантийного субстрата, испытавшим повторное плавление. Долериты и габбро с той же станции по характеру расположения соответствующих им расчетных трендов могли быть сформированы из расплавов, отделившихся от подобного повторно деплетированного мантийного источника и, таким образом, нельзя исключать их комплементарности ассоциирующему с ними гарцбургиту.

На станции 16ABP68, расположенной в западном борту рифтовой долины южного сегмента САХ в непосредственной близости к пику геохимической аномалии  $14^{\circ}48'$ , мантийные перидотиты обладают изотопными параметрами, идентичными таковым в реститах станции 16ABP71 (рис. 10). Таким образом, мантийные реститы из рифтовой долины южного сегмента САХ за исключением гарцбургита, представленного обр. FR03-04b, резко отличаются по изо-

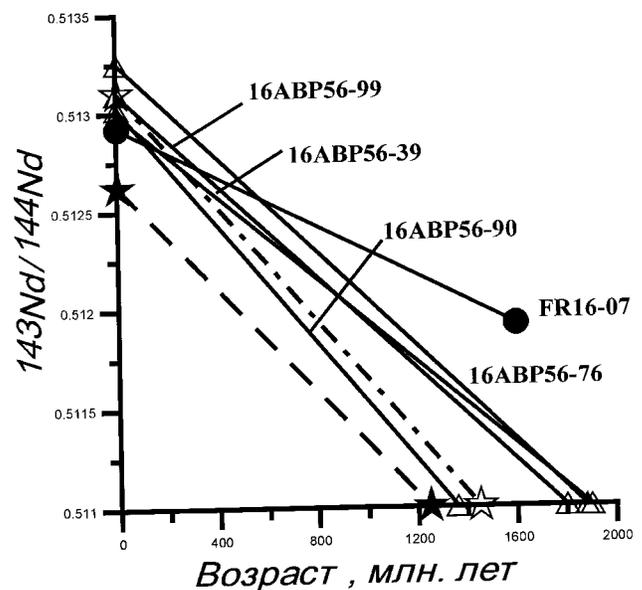


Рис. 7. Расчетные тренды эволюции во времени изотопного состава Nd в мантийных реститах и ассоциирующих магматических породах станции 16ABP56 и мантийных реститах станции FR16.

топному составу неодима и характеру расчетных трендов его эволюции во времени от перидотитов северного сегмента хребта. Анализ данных, приведенных на рис. 5–10, приводит к неожиданному выводу об отсутствии в рассмотренных сегментах САХ представителей базальтового магматизма, которые могли бы рассматриваться в качестве продуктов плавления мантийного вещества с изотопными характеристиками, свойственными мантийным рестидам южного сегмента САХ.

#### 4.3. Трансформный разлом 15°20'

Мантийный перидотит станции 16АВР75 (обр. 16АВР75-50), которая расположена в южном борту офсетной части разлома, так же как перидотиты расположенной восточнее станции 16АВР71, в рамках используемой модели может рассматриваться как представитель мантийного вещества, отделившегося от СНUR около 500 млн лет т.н. и, таким образом, не связан с производными базальтового магматизма, изотопные характеристики которых приведены в табл. 1 (рис. 11). Примечательно, что изотопные характеристики перидотита станции 16АВР75 соответствует таковым в перидотитах, отобранных в других районах южного сегмента САХ и не имеющих, судя по изотопным данным, генетических связей с современным вулканизмом рифтовой долины.

На станции 12АВР17, расположенной в трансформном разломе к востоку от его пересечения

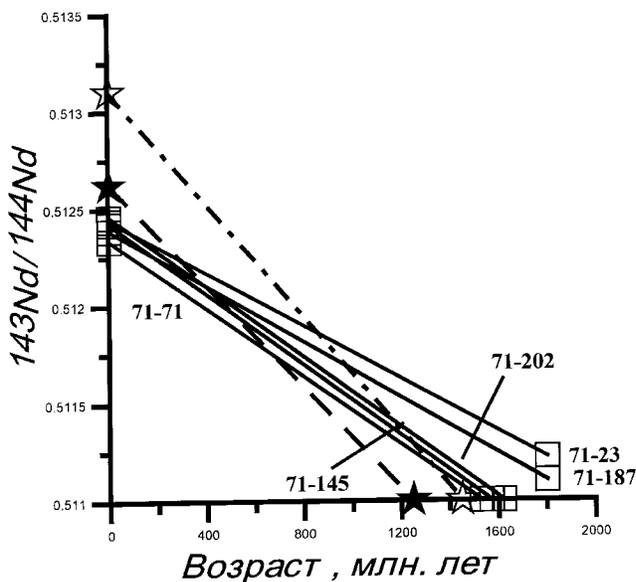


Рис. 8. Расчетные тренды эволюции во времени изотопного состава Nd в мантийных рестидах станции 16АВР71.

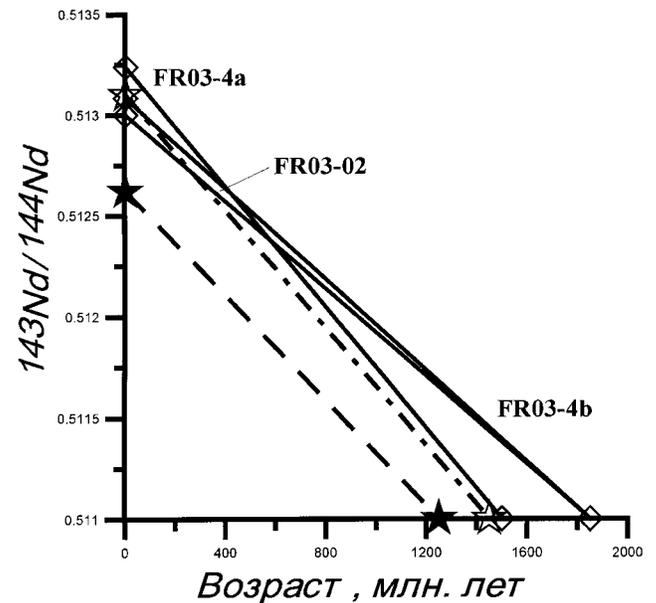


Рис. 9. Расчетные тренды эволюции во времени изотопного состава Nd в мантийных рестидах и ассоциирующих магматических породах станции FR03.

с южным сегментом САХ, рестигогенные перидотиты по своим изотопным параметрам аналогичны большей части перидотитов северного сегмента и представляющим в изотопном отношении исключение среди перидотитов южного сегмента гарцбургитам станции FR03. При допущении происхождения перидотитов станции 12АВР17 (обр. 12АВР17-7) за счет плавления источника типа DM из изотопных данных следует, что это событие могло произойти 350–400 млн лет т.н. С другой стороны, полагая что между мантийными рестидами станции 12АВР17 и ассоциирующими с ними габбро (обр. 12АВР17-5) существует генетическая связь, можно интерпретировать расположение расчетных эволюционных трендов на рис. 11, как результат разделения мантийного рестида и родоначального для габброида расплава 600–700 млн лет т.н. Как и в случае перидотитов северного сегмента САХ (станция 16АВР56), мантийные рестиды станции 12АВР17 обнаруживают признаки слабого наведенного обогащения.

Изотопные характеристики неодима в мантийных рестидах из двух рассмотренных районов трансформного разлома указывают на присутствие в южном борту офсетной части трансформации перидотитов, относящихся по геохимическим особенностям к аномальному в изотопном отношении мантийному субстрату, свойственному южному сегменту САХ, в то время как к востоку от офсета, в пассивной части разлома, по крайней мере в районе станции

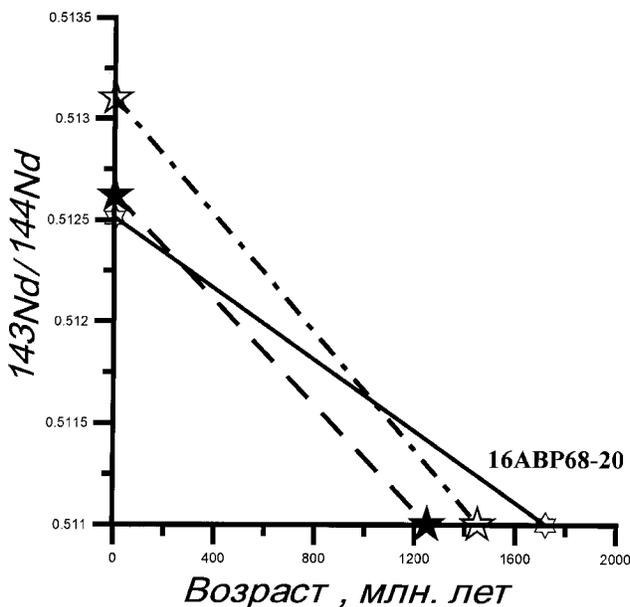


Рис. 10. Расчетные тренды эволюции во времени изотопного состава Nd в мантийных реститах станции 16ABP68.

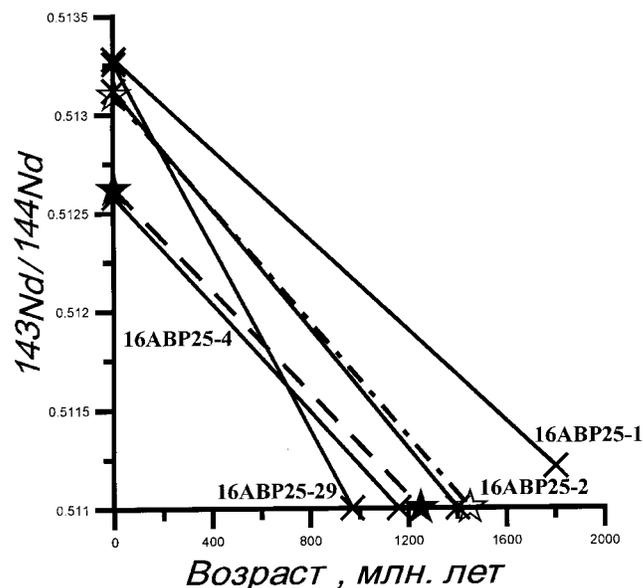


Рис. 12. Расчетные тренды эволюции во времени изотопного состава Nd в мантийных реститах и ассоциирующих амфиболитах станции 16ABP25.

12ABP17, отмечаются признаки выходов на поверхность океанического дна мантийных перидотитов, соответствующих мантийному субстрату типа повторно деплетированной DM, который распространен в северном сегменте САХ.

#### 4.4. Разломная зона Хэйс

Данные, отображенные на рис. 12, отчетливо демонстрируют различия в трендах эволюции изотопного состава неодима, характерных для ортоамфиболитов основного состава (обр. 16ABP25-1) и ассоциирующих с ними на станции 16ABP25 метAPERидотитов (обр. 16ABP25-2, 4 и 29). Среди последних по результатам моделирования можно выделить следующие группы пород: 1) мантийные реститы, практически идентичные веществу DM (обр. 16ABP25-2); 2) мантийные перидотиты, близкие по изотопным характеристикам веществу CHUR (обр. 16ABP25-4); 3) ультраосновные породы, резко отличающиеся от реститовых перидотитов из двух первых групп существенно более высоким отношением Sm/Nd (обр. 16ABP25-29). Следует заметить, что по этому параметру перидотиты, представленные образцом 16ABP25-29, близки к присутствующим на той же станции амфиболитам основного состава и образцу ультраосновного амфиболита (16ABP25-25), содержания РЗЭ для которых приведены в [Silant'ev et al., 19956]. Таким образом, представляется возможным, что в районе западного пересечения САХ и разломной зоны Хэйс пространственно совмещены мантийные реститы, представляющие два контрастных в геохимическом отношении типа мантийного вещества, один из которых близок к CHUR (PM), а другой соответствует

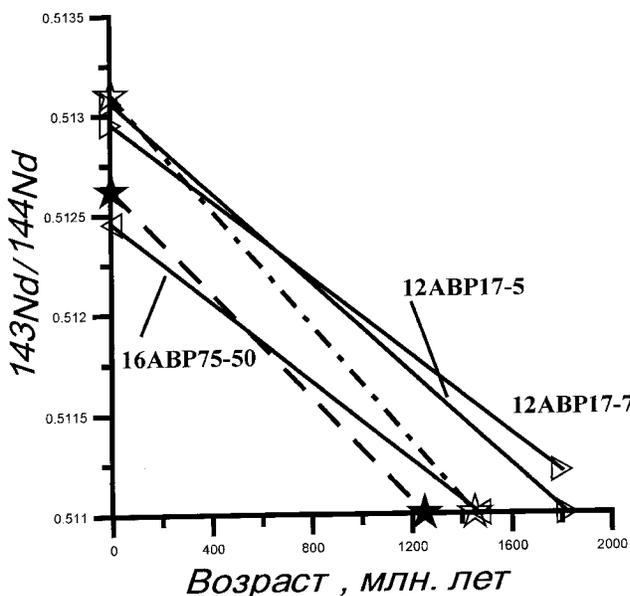


Рис. 11. Расчетные тренды эволюции во времени изотопного состава Nd в мантийных реститах станции 16ABP75 и мантийных реститах и ассоциирующих магматических породах станции 12ABP17.

DM. С этими мантийными реститами ассоциируют амфиболизированные базиты и гипербазиты, представляющие продукты фракционирования расплава, родоначального для MORB и отделившегося от мантийного источника типа DM.

## 5. Заключение

Рассмотренные в настоящей работе данные и предложенная их интерпретация позволяют очертить некоторые главные закономерности в распределении различных геохимических типов мантийного вещества под гребневой зоной САХ и идентифицировать главные эндогенные факторы, определяющие существенное разнообразие изученных мантийных реститов.

Одним из наиболее принципиальных результатов проведенного исследования является установленное и повсеместно проявленное несоответствие в оценках степени плавления экстремально деплетированных мантийных перидотитов САХ между 14 и 16° с.ш., базирующихся на использовании параметров состава реститовой шпинели и на привлечении данных по Sm/Nd отношению в тех же породах. Подобное несоответствие указывает на широкомасштабное взаимодействие мантийного субстрата с обогащенными несовместимыми элементами магматическими расплавами или флюидами. Прямым следствием такого магматического взаимодействия можно считать минералогические признаки мантийного метасоматизма, установленные в мантийных реститах рассмотренных сегментов САХ и заключающиеся в развитии в этих породах флогопитовой и амфиболовой минерализации. Примечательно, что представители метасоматизированной мантии тесно ассоциируют в районе станций 16ABP56, 16ABP68 и 16ABP75 с экстремально деплетированными перидотитами [Silant'ev et al., 2000]. Геохимические особенности магматических расплавов, вызывающих наведенное обогащение в мантийных перидотитах САХ между 14 и 16°, судя по существующим данным о составе разнообразных вулканических и плутонических пород из этого региона [Dosso et al., 1991; Silant'ev, 1998; Sobolev et al., 1992; Xia et al., 1992], позволяют относить их к производным плюмового магматизма. Таким образом, феномен обогащенности ЛРЗЭ экстремально деплетированных перидотитов САХ может быть обусловлен комбинацией двух присущих плюмовому магматизму особенностей: высоких степеней плавления в мантийных источниках и их геохимической аномальности. Следует заметить, что в настоящее время плавлению плюмовых мантийных источников отводится важная роль в моделях магматизма современных оке-

анических бассейнов. В [Morgan, 1999] предложен механизм экстракции расплавов при прогрессивном плавлении гетерогенных мантийных источников плюмовой природы и их взаимодействие с мантийным веществом при его последующем частичном плавлении. Иницирующая роль в мантийном плавлении под срединно-океаническими хребтами отводится плюмовому магматизму в модели двухстадийного плавления, рассмотренной в [Morgan and Morgan, 1999] и согласно которой умеренно деплетированные реститы от плавления плюмового источника впоследствии, при своем подъеме, подвергаются повторному плавлению. Выше расчетными методами было показано, что во многих случаях сильно деплетированные мантийные перидотиты САХ по мере своей эволюции во времени должны были испытывать неоднократное плавление. В свою очередь, интерпретация изотопных характеристик базальтов и габброидов, ассоциирующих с этими перидотитами, допускает их происхождение за счет повторного плавления мантийного источника. Приведенные данные позволяют допускать, что неоднократное плавление мантии под осевой зоной САХ является универсальной чертой магматизма низкоскоростных спрединговых центров. Очевидно также, что между магматизмом плюмового типа, свойственным аномальным сегментам САХ, и магматизмом нормальных его сегментов существует тесная связь, определяющая последовательность магматических событий в гребне хребта и его мелкомасштабную вещественную сегментацию.

Из проведенного исследования следует, что в Центральной Атлантике, под гребневой зоной САХ, существуют отчетливые признаки изотопно-геохимической сегментации мантии. Полученные в настоящей работе результаты подтверждают высказанное ранее предположение о вещественной гетерогенности мантии под САХ между 13 и 17° с.ш. [Silant'ev et al., 1998]. Примечательно, что в обоих рассмотренных районах гребневой зоны хребта пространственно совмещены сегменты САХ нормального (спредингового) и аномального в геохимическом отношении типов. Особенно выразительно этот контраст в вещественном строении мантии проявлен в сегментах САХ, расположенных к югу и северу от разломной зоны 15°20'. На западном пересечении САХ и разломной зоны Хэйс, в районе 33°40' с.ш., представители аномальной (недеплетированной) мантии и мантии типа DM очевидно совмещены тектонически и маркируют южное окончание Азорского мегаплюма. Следует особо подчеркнуть, что мантийные перидотиты аномального (плюмового) типа, судя по приведенным данным, могут иметь более широкое распространение в САХ, чем это предполагалось ранее.

Ключевым вопросом в расшифровке главных эндогенных факторов, определяющих фундаментальные различия между магматизмом нормальных и аномальных сегментов САХ, является геохимическая природа мантийных источников, плавление которых продуцирует контрастные в изотопно-геохимическом отношении магматические серии. Общепринято считать, что источники плюмового магматизма характеризуются большей глубиной, чем резервуары типа DM или DMM [например, *Hofmann, 1997*], а изотопные характеристики магматических пород Центральной и Северной Атлантики, как и в N-MORB в целом, располагаются вдоль линии смещения двух главных мантийных компонентов: DM и HIMU (SHC) [*Hofmann, 1997; Wilson, 1989*]. Однако данные, приведенные в настоящей работе, определенно свидетельствуют о присутствии в гребневой зоне САХ вблизи 15°20' с.ш. мантийных реститов с изотопными характеристиками, резко “уводящими” их с этой линии смещения в область низких значений  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ . В эту аномальную группу попадают как экстремально деплетированные перидотиты дунит-гарцбургитовой ассоциации, так и флогопитовые дуниты, генетически не связанные с продуктами современного магматизма САХ и близкие по геохимическим параметрам к веществу древней субконтинентальной мантии. В этой связи необходимо иметь в виду, что по существующим представлениям мантийные резервуары типа EM1 и EM2, с близким к установленному в мантийных реститах из сегмента САХ к югу от 15°20' с.ш. изотопным составом Nd и продуцирующие OIB, характерны для плюмовых регионов или горячих точек, расположенных, главным образом, к югу от экватора, где установлены признаки существования глобальной мантийной геохимической аномалии DUPAL [*Dupre and Allegre, 1983*]. Следует заметить, что в MORB из многих районов Южной Атлантики фиксируются изотопные метки магматизма плюмового типа [*Dupre and Allegre, 1983; Hart, 1984; Humphris et al., 1985*], близкие к установленным в мантийных перидотитах САХ между 13 и 15° с.ш. В этой связи особый интерес представляет установленный выше феномен отсутствия в рассмотренных сегментах САХ базальтоидов и плутонических пород, которые могли бы рассматриваться как продукты плавления мантийного субстрата с изотопными характеристиками, свойственными мантийным реститам сегмента САХ, расположенного к югу от разлома 15°20'. В [*Douglass and Schilling, 1999*] предполагается, что наиболее универсальной чертой “изотопной физиономии” мантии под Южной Атлантикой и Индийским океаном, является участие в ее составе компонента LOMU ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} < 0,51200$ ), обусловленное инкорпорацией в мантийные источ-

ники вещества дезинтегрированной и расслоенной субконтинентальной мантии Гондваны. Примечательно, что анализ изотопно-геохимических особенностей базальтов САХ между 31 и 41° с.ш. позволил Л. Доссо с коллегами [*Dosso et al., 1999*] предположить существование вещественной гетерогенности мантийных источников, продуцирующих эти породы, которая, по мнению этих авторов, была сформирована до открытия бассейна современной Атлантики и отражает фрагментацию и рифтинг древнего суперконтинента Гондвана. Это предположение в цитируемой работе, обосновывается изотопными возрастными, аттестующими магматическую эволюцию мантийных источников и их повторное обогащение под этим районом САХ, которые составили 100–300 и 250 млн лет, соответственно. Обращает на себя внимание совпадение порядка возрастных интервалов, оцененных в настоящей работе с полученными в [*Dosso et al., 1999*]. С другой стороны, приведенные выше изотопно-геохимические характеристики мантийных реститов из САХ в районе 33°40' с.ш. в свою очередь подтверждают возможность присутствия здесь под гребневой зоной хребта фрагментов аномальной мантии плюмового или субконтинентального типов. В рамках обсуждаемой проблемы следует также иметь в виду, что в изотопно-геохимическом отношении аномальные перидотиты САХ в районе 13–17° с.ш. близки к расположенным далеко к югу (0°56' с.ш.) перидотитам скал Святого Павла, изотопно-геохимические характеристики которых приведены в [*Roden, 1987; Roden et al., 1984*] и которые по общепринятому мнению относятся к представителям древней метасоматизированной мантии, не связанной с современным магматизмом САХ. Таким образом, появляются основания предполагать, что аномальные в геохимическом отношении мантийные перидотиты САХ в зонах его пересечения с разломом 15°20' относятся к фрагментам мантийного субстрата, чужеродного для мантии под Атлантикой к северу от экватора. Из этого допущения следует констатация отсутствия генетической связи между продуктами современного магматизма рифтовой долины в рассмотренных сегментах САХ и ассоциирующими мантийными реститами. С другой стороны, факт обнаружения в гребневой зоне САХ на значительном удалении к северу от экватора мантийных перидотитов с аномально низкими величинами отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  может свидетельствовать о крупномасштабном (планетарном) взаимодействии мантийных резервуаров южного и северного полушария под акваторией Атлантического океана.

**Благодарность.** Проведенное исследование было поддержано грантом РФФИ № 00-05-64165 и Министер-

ством Науки и Технологий РФ – проект “Ключевые районы Срединно-Атлантического хребта (САХ)”.

## Литература

- Силантьев С. А., Беязцкий Б. В., *Концентрация и изотопный состав стронция, свинца и неодима в мантийных реститах Срединно-Атлантического хребта и их связь с эндогенными и экзогенными факторами аккреции океанской литосферы*, XV Симпозиум по геохимии изотопов им. академика А. П. Виноградова, Тезисы докладов, с. 260–261, Москва, 1998.
- Amelin Yu. V. and Semenov V. S., Nd and Sr isotopic geochemistry of mafic layered intrusions in the eastern Baltic shield: implications for the evolution of Paleoproterozoic continental mafic magmas, *Contrib. Mineral. Petrol.*, *124*, 255–272, 1996.
- Bazylev B. A., Allochemical Metamorphism of the Mantle Peridotites in the Heyes Fracture Zone of the North Atlantic, *Petrology* *5*, (4), 322–337, 1997.
- Bougault H., Dmitriev L., Schilling J. -G., Sobolev A., Joron J. L. and Needham H. D., Mantle heterogeneity from trace elements: MAR triple junction near 14°N, *Earth and Planetary Science Letters*, *88*, 27–36, 1988.
- De Paolo D. J. and Wasserburg G. J., Nd isotopic variations and petrogenetic models, *Geophys. Res. Letters*, *3*, 249–252, 1976.
- Dosso L., Hanan B. B., Bougault H., Schilling J. -G. and Joron J. -L., Sr-Nd-Pb geochemical morphology between 10 and 17°N on the Mid-Atlantic Ridge: a new MORB isotope signature, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, *106*, 29–43, 1991.
- Dosso L., Bougault H., Langmuir C., Bollinger C., Bonnier O. and Etoubleau J., The age and distribution of mantle heterogeneity along the Mid-Atlantic Ridge (31–41°N), *Earth Planet. Sci. Letters*, *170*, 269–286, 1999.
- Douglass J. and Schilling J.-G., Plume-ridge interactions of the Discovery and Shona mantle plumes with the southern Mid-Atlantic Ridge (40–55°S), *J. Geophys. Res.*, *104*, (B2), 2941–2962, 1999.
- Dupre B. and Allegre C. J., Pb-Sr isotopic variations in Indian Ocean basalts and mixing phenomena, *Nature*, *303*, 142–146, 1983.
- Faure G., *Principles of Isotope Geology*, John Wiley & Sons, New York, 520, 1986.
- Gracia E., Parson L. M., Bideau D. and Hekinian R., Volcano-tectonic variability along segments of the Mid-Atlantic Ridge between Azores platform and Hayes fracture zone: evidence from submersible and high-resolution sidescan sonar data, in: Mills R. A. and Harrison K. (Eds.), *Modern Ocean Floor Processes and the Geological Record*, p. 1–15, 148, Geological Society, London, Special Publication, 1998.
- Hart S. R., The DUPAL anomaly: a large-scale isotopic anomaly in the southern hemisphere, *Nature*, *309*, 753–756, 1984.
- Hofmann A. W., Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism, *Nature*, *385*, 219–229, 1997.
- Humphris S. E., Thompson G., Schilling J. -G. and Kingsley R. H., Petrological and geochemical variations along the Mid-Atlantic Ridge between 46°S and 32°S: Influence of the Tristan da Cunha mantle plume, *Geochim. Cosmochim. Acta*, *49*, 1445–1464, 1985.
- Mason B., *Principles of Geochemistry*, John Wiley & Sons, New York, 329, 1966.
- Morgan J. P., Isotope topology of individual hotspot basalt arrays: Mixing curves or melt extraction trajectories? *Geochem. Geophys. Geosys.*, *1*, Paper № 1999GC000004, 20 p., 1999.
- Morgan J. P. and Morgan W. J., Two-stage melting and the geochemical evolution of the mantle: a recipe for mantle plum-pudding, *Earth Planet. Sci. Lett.*, *170*, 215–239, 1999.
- O’Nions R. K., Relationships between chemical and convective layering in the Earth, *J. Geol. Soc. Lond.*, *144*, 259–274, 1987.
- Roden M. K., Hart S. R., Frey F. A. and Melson W. G., Sr, Nd and Pb isotopic and REE geochemistry of St. Paul’s Rocks: the metamorphic and metasomatic development of an alkali basalt mantle source, *Contribution to Mineralogy and Petrology*, *85*, 376–391, 1984.
- Roden M. F., Rb/Sr and Sm/Nd ratios of metasomatized mantle: Implications for the role of metasomatized mantle in the petrogenesis of Na<sub>2</sub>O-rich alkaline basalts, *Geological Society of America Special Paper*, *215*, 127–138, 1987.
- Silant’ev S. A., Dmitriev L. V., Bazylev B. A., Casey J. F., Bougault H., Levisky L. K., Belyatsky B. V. and Ovchinnikova G. V., An examination of genetic conformity between co-existing basalts, gabbro, and residual peridotites from 15°20’ Fracture Zone, Central Atlantic: evidence from isotope composition of Sr, Nd, and Pb, *InterRidge News*, *4*, (2), 18–21, 1995a.
- Silant’ev S. A., Casey J. F. and Smith S. E., Composition and Metamorphic Conditions of Rocks from the Third Layer of the Oceanic Crust in an Offset of the Hayes Fracture Zone, Central Atlantic, *Petrology*, *3*, (5), 424–439, 1995b.
- Silant’ev S. A., Casey J. F., Dick H. J. B., Dmitriev L. V., Bazylev B. A. and Belyatsky B. V., How many mantle sources involved in formation of residual peridotites from MAR between 14 and 16°N? European Geophysical Society. Annales Geophysicae, Part 1, Society Symposia, Solid Earth Geophysics & Geodesy, Supplement 1 to Volume 16, c. 294, 1998.
- Silant’ev S. A., Origin Conditions of the Mid-Atlantic Ridge Plutonic Complex at 13–17°N, *Petrology*, *6*, 351–387, 1998.
- Silant’ev S. A., Bazylev B. A. and Morozov O. L., Correlation between geochemical features of the MAR residual peridotites (13–16°N) and ophiolitic mantle peridotites (Povorotny Cape Accretionary Complex): difference or similarity? GEOSCIENCE 2000, Conference Abstracts, University of Manchester, 75 p., 2000.
- Snow J. E. and Reisberg L., Os isotopic systematics of MORB mantle: results from altered abyssal peridotites, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, *133*, 411–421, 1995.
- Sobolev A. V., Tsameryan O. P., Dmitriev L. V. and Ba-

- sylev B. A., The correlation between mineralogy of basalts and associated peridotites: The data for MAR between 8–18°N, *Eos, Transactions*, 73, (43), AGU Fall Meeting, 584, 1992.
- Sun S.-S. and McDonough W. F., Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, in: Saunders A. D., Norry M.J. (Eds.), *Magmatism in Ocean Basins*, Geol. Soc. Spec. Publ., London 42, 313–345, 1989.
- Verma S. P., Seawater alteration effects on REE, K, Rb, Cs, Sr, U, Th, Pb and Sr-Nd-Pb isotope systematics of Mid-Ocean Ridge Basalt, *Geochemical Journal*, (26), 159–177, 1992.
- Wilson M., *Igneous Petrogenesis*, Unwin Hyman, Boston-Sidney-Wellington, 466 p., 1989.
- Xia C., Casey J. F., Silantyev S., Dmitriev L. and Bougault H., Geochemical variations between 12 to 16°N, Mid-Atlantic Ridge: A region with high degrees of partial melting yet magma starved? *Eos Trans., Amer. Geophys. Union*, 73, (43), 553 p., 1992.

(Поступила в редакцию 16 ноября 2000.)