

Возраст магматических и метаморфических событий в САХ: интерпретация данных изотопного К-Аг датирования

С. А. Силантьев

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

Л. К. Левский

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН

М. М. Аракелянц, В. А. Лебедев

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

H. Bougault

IFREMER, Брест, Франция

M. Cannat

Universite Pierre et Marie Curie (Paris 6), Париж, Франция

Аннотация. Объект изучения был представлен гнейсовидными габбро из плутонического комплекса, слагающего противоположные борта рифтовой долины сегмента САХ, расположенного непосредственно к северу от разломной зоны $15^{\circ}20'$. Полученные данные по изотопному К-Аг датированию указывают на возможность существования возрастной асимметрии в однотипных комплексах пород, слагающих противоположные борта рифтовой долины САХ между 15 и 16° с.ш. Возрастная оценка, полученная для образца габбро с западного борта рифтовой долины, возможно, отражает время магматического взаимодействия этой породы с инъекциями трондъемитового расплава и очевидно соответствует этапу кристаллизации трондъемитового жильного комплекса. С другой стороны, возраст, определенный для образца габбро, отобранного в восточном борту рифтовой долины, вероятно, отвечает времени его кристаллизации в магматической системе или относительно высокотемпературной перекристаллизации при метаморфизме. Установленная возрастная асимметрия противоположных бортов рифтовой долины, не связана с различиями в метаморфической эволюции изученных габбро, поскольку им свойственна одинаковая степень метаморфизма. Результаты проведенного исследования и синтез всех существующих данных по изотопному датированию разнообразных плутонических пород САХ позволяет предполагать присутствие в его гребневой зоне двух типов магматических комплексов, не соответствующих в возрастном отношении современному магматизму рифтовой долины: 1) локализованного в сегментах с корой Хессовского типа со сверхнизкими скоростями спрединга и связанного с повторным плавлением в мантийных условиях линз и прослоев кумулятивных пород, часто с аномальными геохимическими характеристиками; 2) представленного реликтами литосферы суперконтинента Гондвана и характеризующегося изотопным возрастом порядка сотен миллионов лет.

1. Введение

Главной целью проведенного исследования является синтез всех оригинальных и опубликованных данных по изотопному датированию разнообразных плутонических пород гребневой зоны Срединно-Ат-

©2000 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE00044.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 5 января 2001.

URL: <http://eos.wdcb.ru/rjes/v03/RJE00044/RJE00044.htm>

лантического хребта и их интерпретация в свете существующих представлений о его мелкомасштабной вещественной сегментации и о возможном нарушении генетического соответствия пород из гипербазит-габбро-базальтового комплекса [Silant'ev et al., 1995]. Поскольку в изученных плутонических породах в различной степени проявлены признаки метаморфической перекристаллизации, происходящей в широком температурном интервале и во всем диапазоне мощности океанической литосферы, рассмотренные оценки возраста позволяют судить о временной последовательности главных этапов аккреции океанической литосферы от становления магматического комплекса пород фундамента до его перекристаллизации, обусловленной экзогенными факторами, главным из которых является взаимодействие пород с флюидом морского происхождения.

Объекты изучения были представлены гнейсовидными разновидностями габброидов, традиционно рассматриваемым как обычные литологические компоненты разреза 3-го слоя океанической коры. Во многих сегментах САХ ассоциация подобных плутонических пород с реститогенными перидотитами слагает протяженные подводные обнажения как в трансформных разломах, так и в бортах рифтовой долины. Такое строение океанической коры (кора Хессовского типа) является характерной особенностью низкоскоростных центров спрединга и предоставляет уникальную возможность методами изотопной геохимии напрямую идентифицировать вещественный состав мантийного субстрата под срединно-океаническими хребтами и оконтурить временные координаты мантийного диапиризма и связанных с ним магматических и метаморфических событий.

Попытки изотопного датирования пород океанического фундамента в гребне и на флангах САХ предпринимаются с 1969 г., когда появилась работа [Aumento and Lancarevic, 1969], в которой были представлены данные К-Аг датирования габброидов, драгированных на западном фланге САХ (45° с.ш.), свидетельствующие о древнем возрасте этих пород: 785 млн лет. Изотопное датирование плутонических пород проводилось также в рамках проекта DSDP: в этом случае изучались габбро, пробуренные скважиной 334 (район FAMOUS, западный фланг САХ, 37° с.ш.). Полученный для этих габброидов ^{40}Ar - ^{39}Ar методом возраст, определенный при различных температурах дегазации, составил 635–135 млн лет [Reynolds and Clay, 1977]. Драгированные в гребне САХ на 26° с.ш. амфиболитизированные габбро и единственный фрагмент плагиогранита, как следует из результатов К-Аг датирования, приведенных в работе [Трухалев и др., 1990], также характеризуются неожиданно древними возрастaми: в габбро – 562

± 33 млн лет (валовая проба), 517 ± 32 млн лет (клинопироксен), 550 ± 33 млн лет (плагиоклаз); в плагиограните – 1 631 ± 106 млн лет (биотит). Датирование мономинеральных фракций, выделенных из того же образца плагиогранита, предпринятое позже, дало следующие значения возраста для этой породы: по циркону (U-Pb) – от 1648 до 1853 млн лет; Sm-Nd (минеральная изохрона) – 1687 млн лет [Беляцкий и др., 1997]. Примечательно, что оценки возраста плагиогранита, полученные по Sm-Nd минеральной изохроне, соответствуют возрасту, оцененному К-Аг методом для биотита из той же породы.

Новые данные по изотопному датированию габброидов САХ приводятся в работе [Pilot et al., 1998], где сообщается об обнаружении в габбро, пробуренном в зоне пересечения САХ и разломной зоны Кэйн (вблизи 23° 32' с.ш.), циркона с возрастом около 330 и 1600 млн лет ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ метод).

Датированию подвергались также типичные метабазиты САХ: гнейсовидные амфиболиты, отобранные на удалении 196 и 207 км от оси САХ с северного склона поперечного хребта, простирающегося параллельно южному борту разлома Вима (10–11° с.ш.). К-Аг методом в [Honnorez et al., 1984] были получены следующие оценки изотопного возраста: по амфиболу, выделенному из различных образцов – 7,8 ± 3,7 млн лет (обр. Dr10-81), 13,1 ± 1,8 млн лет (обр. Dr10-83), 9,6 ± 1,5 млн лет (обр. 10-16), 7,1 ± 2,3 млн лет (обр. Dr10-20), 8,6 ± 1,4 млн лет (обр. Dr10-77); по плагиоклазу – 19,6 ± 4,1 млн лет (обр. Dr10-83), 10,9 ± 2,5 млн лет (обр. Dr10-16); по валовой пробе – 14,8 ± 1,5 млн лет (обр. Dr10-83), 17,8 ± 1,6 млн лет (обр. Dr10-23).

Очевидно, что существующие данные по изотопному датированию изверженных и метаморфических пород САХ находятся в резком противоречии с общепринятыми представлениями о временных параметрах аккреции океанской литосферы в гребневой зоне срединно-океанических хребтов, которые базируются на канонической модели спрединга. В некоторых из упомянутых выше работ высказывается предположение, что древние возрастa, полученные для океанических габбро, имеющих обычно низкие содержания калия, отражают избыток радиогенного аргона в системе, что и объясняет несоответствие возрастa, определенного К-Аг методом с модельным (геофизическим) возрастом участка океанического ложа, в котором был добыт исследованный образец [например, Reynolds and Clay, 1977]. Однако следует заметить, что, как будет показано ниже, древние значения возрастa определены тем же методом и в плутонических породах САХ с относительно высокими содержаниями калия. С другой стороны, необходимо иметь в виду приведенные выше древние воз-

Таблица 1. Типы изученных пород и местоположение их отбора

№ образца	Координаты отбора	Тектоническая позиция	Порода	Минеральный состав
FR12-05	15°37' с.ш., 46°32' з.д.	Восточный борт рифтовой долины	Гнейсовидное габбро	клинопироксен + ортопироксен + плагиоклаз + ильменит + магнетит + биотит + калиевый полевой шпат + Al-актинолит + хлорит
FR16-02	15°30' с.ш., 46°40' з.д.	Западный борт рифтовой долины	Гнейсовидное габбро	клинопироксен + ортопироксен + плагиоклаз+ильменит + магнетит + биотит + калиевый полевой шпат + Al-актинолит + хлорит

растные оценки, полученные по циркону $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ методом.

Феномен систематического отклонения возрастных оценок, полученных для пород и минералов САХ К-Аг или Аг-Аг методами от модельного возраста гребневой зоны хребта может отражать воздействие на используемую для датирования изотопную систему эндогенного (магматического) или экзогенного (гидротермального) факторов. Возможные ограничения, которые накладывают указанные факторы на использование К-Аг или Аг-Аг методов для датирования пород океанической коры, обсуждаются ниже.

2. Объект изучения

Объектом изучения являлись гнейсовидные габбро (табл. 1), отобранные с борта подводной лодки "Nautile" в экспедиции НИС "L'Atalante" в рамках проекта FARA в рифтовой долине сегмента САХ, расположенном непосредственно к северу от разломной зоны 15°20'.

Этот район САХ характеризуется хорошей опробованностью обоих бортов рифтовой долины и большим количеством данных по вещественному составу распространенных здесь габброидов и ассоциирующих с ними перидотитов, базальтоидов и жильных трондьемитов [Сколотнев и др., 1989; Cannat and Casey, 1995; Cannat et al., 1992; Silantsev, 1998; Silantsev et al., 1995]. Рассмотренный участок рифтовой долины относится к сегментам САХ, в которых широко развита кора Хэссовского типа, сложенная преимущественно мантийными реститами и габбро, и, таким образом, может быть использован для определения скоростных параметров спрединга на основе изотопного датирования пород из плутонического комплекса приосевой зоны хребта. В связи

с этим, наиболее веским аргументом в пользу выбора для датирования образцов FR12-05 и FR16-02 является географическое положение станций погружения подводной лодки Nautile, на которых были отобраны эти образцы: станции FR12 и FR16 расположены практически друг напротив друга на противоположных бортах рифтовой долины (восточном и западном, соответственно) (рис. 1). Таким образом, исходя из общепринятых представлений о геодинамической эволюции океанических рифтов, следует предполагать одновозрастность комплексов пород, опробованных на указанных станциях.

В районе станции FR12 восточный борт рифтовой долины сложен перидотит-габбро- базальтовым комплексом, представленным флогопит-содержащими дунитами, офитовыми и гнейсовидными габбро, а также подчиненными афировыми базальтами. На станции FR16, наряду с габброидами, были обнаружены также шпинелевые гарцбургиты и гидротермально измененные брекчированные флогопит-содержащие перидотиты; с габброидами станции FR16 тесно ассоциируют секущие их жильные трондьемиты.

Оба образца, отобранные для датирования, относятся к типичным гнейсовидным габброидам и очень близки в петрографическом отношении. Этим породам свойственны структурные признаки высокотемпературной перекристаллизации, сопровождавшейся пластичными деформациями. В мелкозернистый мозаичный матрикс этих пород погружены линейно ориентированные крупные зерна реликтового плагиоклаза с явными признаками деформационного воздействия; реже реликтовые вкрапленники представлены ортопироксеном. Матрикс изученных гнейсовидных габбро сложен необластами плагиоклаза, калишпата, клинопироксена, ортопироксена и биотита. В обоих образцах отмечены также обильные титано-магнетит, ильменит и аксессуарный апа-

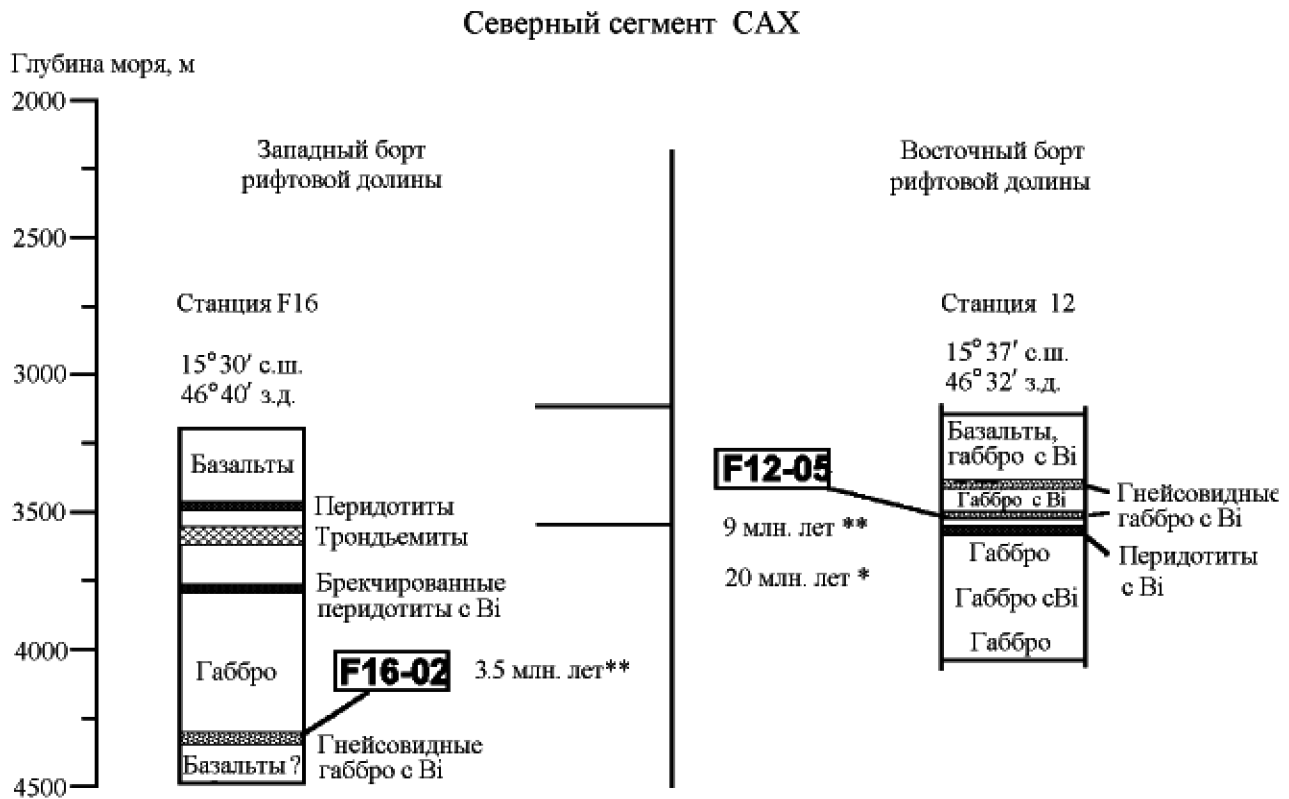


Рис. 1. Схематические разрезы бортов рифтовой долины САХ в районе $15^{\circ}30'$ – $15^{\circ}37'$ с.ш. и соотношение датированных пород с вмещающими магматическими комплексами. * и ** – возрастные оценки получены в ИГГД РАН и ИГЕМ РАН, соответственно.

тит. Темноцветные фазы в гнейсовидных габбро частично замещены вторичными роговой обманкой, актинолитом и подчиненным хлоритом.

3. Аналитические методы исследования

В лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН содержание калия в образцах измерялось методом пламенной спектрофотометрии с использованием дифракционной решетки, фотумножителя и высокочувствительного гальванометра. Точность определения малых концентраций калия составляла 3–4%. Содержание радиогенного аргона определялось методом изотопного разбавления с применением в качестве трасера моноизотопа ^{38}Ar . Измерения проводились на специализированном масс-спектрометрическом комплексе в статическом режиме. Основные характеристики измерительного комплекса, созданного в ИГЕМ РАН на базе прибора МИ 1201 ИГ (чувствительность по аргону 5×10^{-3} А/торр и уровень холостого опыта – 5×10^{-10} нсм³) доведены до уровня лучшего зару-

бежного аналога – масс-спектрометра VG 5400 (“Micromass”, Англия). Точность измерений контролировалась систематическими измерениями содержания $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$ в стандартных образцах “биотит-70А”, мусковит “Р-207”, биотит и мусковит “Вегн-4М”, а также измерением изотопного состава воздушного аргона. В ИГГД РАН содержание $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$ измерялось на приборе МИ 13-30.

При расчете возраста использовались константы: $\lambda_{\text{K}} = 0,581 \times 10^{-10} \text{ год}^{-1}$, $\lambda_{\beta-} = 4,962 \times 10^{-10} \text{ год}^{-1}$, $^{40}\text{K} = 0,01167$ (ат.%). Полученные результаты определения К-Аг возраста приведены в табл. 2.

4. Влияние на возрастные оценки эндогенных и экзогенных факторов

При К-Аг датировании вулканитов из глубоководных морских обстановок возникает две основные проблемы. Во-первых, базальтовая магма при излиянии в подводной обстановке обычно превращается в стекло. Благородные газы, включая радиогенный аргон, предположительно происходящие из областей образования магмы, часто захватыва-

Таблица 2. Результаты изотопного датирования габброидов рифтовой долины САХ в районе 15°30'–15°37' с.ш.

№ образца	Порода	Калий, % ± σ	$^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$ (нг/г) ± σ	Возраст, млн лет ± 1,6 σ
FR12-05*	Гнейсовидное габбро	0,26 ± 0,01	0,362 ± 0,20	20 ± 5
FR12-05**	Гнейсовидное габбро	0,25 ± 0,01	0,16 ± 0,01	9 ± 1
FR16-02**	Гнейсовидное габбро	0,27 ± 0,01	0,065 ± 0,004	3,5 ± 0,4

* – аналитические исследования проводились в ИГГД РАН

** – аналитические исследования проводились в ИГЕМ РАН.

ются в минералах-вкрапленниках и стекле, в результате чего измеренные К-Аг возраста становятся аномально древними [Dalriddle and Moore, 1968; Dymond, 1970; Funkhouser et al., 1968; Noble and Naughton, 1968]. Дж. Далримпл и Дж. Мур [1968] показали, что голоценовые лавы с возрастом моложе 1000 лет, изверженные в обстановке морского дна у активной восточной окраины вулкана Килауэа (Гавайские острова), дают кажущиеся возраста, достигающие 43 млн лет по материалу из сложенных стеклом краев “подушек”. Они обнаружили, что количество избыточного аргона в стекле возрастает с увеличением глубины относительно уровня моря, на которой изливались лавы, что свидетельствует о влиянии гидростатического давления. В то же время, Дж. Далримпл и Дж. Мур [Dalriddle and Moore, 1968] и Дж. Даймонд [Dymond, 1970] продемонстрировали, что во внутренних частях лавовых подушек и каналов, где магма имела возможность как минимум частично раскристаллизоваться из-за более медленных скоростей остывания, большая часть ранее существовавшего аргона теряется или обменивается, и измеренные отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ практически не отличаются от значения для атмосферного аргона. Таким образом, образцы из внутренних частей лавовых потоков могут давать реальные К-Аг возраста [Faure, 1986]. Очевидно, это предположение тем более справедливо для габброидов, которые кристаллизуются в магматических камерах и не подвержены эффекту закалки.

На практике, при датировании глубоководных пород, часто возникает вторая проблема – измененность, которая препятствует получению реальных возрастных данных. Очень немногие магматические породы из глубоководной морской обстановки отвечают критериям свежести и кристалличности для К-Аг датирования, так как гидротермальные изменения и подводное выветривание приводит к развитию хлорита, кальцита, смектитов и других глинистых минералов при замещении преимущественно высокотемпературных минералов. Из-за потери радиогенного аргона из продуктов изменения и прив-

носа калия при подводном выветривании измеренные возраста обычно являются слишком молодыми [Seidemann, 1977]. Таким образом, получение реальных К-Аг возрастов для образцов вулканических пород, отобранных с океанического дна, в большинстве случаев является сложной задачей.

Использование методики $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастных спектров для глубоководных морских вулканических пород обычно также не дает надежных возрастных оценок, так как большинство возрастных спектров являются сложными для интерпретации. Кроме того, при исследованиях по $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датированию образцов океанических пород Д. Клэю с коллегами [Clague et al., 1975], Дж. Далримпл и Д. Клэю [Dalriddle and Clague, 1976], Д. Сейдеманн [Seidemann, 1978] и И. В. Чернышев с соавторами [Чернышев и др., 1996] обнаружили, что во время нейтронного облучения в реакторе и до момента выделения аргона из образцов обычно происходят существенные потери ^{39}Ar , вероятно из кристаллических ячеек в вулканическом стекле, глинах и других продуктах вторичных изменений. Эти потери происходят путем отдачи и из-за плохой сохранности аргона в таких материалах. На величину отношения $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ может влиять также установленный в океанических гидротермальных флюидах избыток ^{40}Ar мантийного происхождения, который в [Stuart and Turner, 1998] объясняется усвоением флюидом летучих при его циркуляции вблизи активных магматических камер. Таким образом, значения возраста $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ общего плавления обычно значительно древнее, чем обычные К-Аг возраста для тех же образцов. Проблемы при интерпретации измеренных для валовых образцов пород возрастных спектров могут возникнуть и из-за того, что датированные образцы состоят из нескольких фаз с различной способностью сохранять аргон. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастные спектры для глубоководных морских вулканических пород редко имеют прямолинейную форму. В тех редких случаях когда на высокотемпературных ступенях имеется сегмент плато, возраст этого плато можно интерпретировать как отражающий время, прошедшее с

момента излияния [Dalrímple et al., 1980; Walker and McDougall, 1982]. Вместе с тем, интерпретировать подобные в различной степени протяженные возрастными плато как значения, отражающие время, прошедшее с момента консолидации кристаллической породы, следует с осторожностью, поскольку не всегда удастся восстановить характер реальных соотношений породообразующих минералов в анализируемом объекте.

Однако в связи с тем, что большинство других изотопных методов не применимо для подводных вулканитов, К-Аг и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование является практически единственным инструментом для получения более или менее реального возраста магматических пород из океанических бассейнов.

В случае океанических габброидов и их метаморфических производных при их К-Аг датировании целесообразно использовать выделенный из этих пород амфибол, который является обычной и широко распространенной в плутонических породах САХ фазой. Однако следует иметь в виду, что наиболее перспективным в отношении датирования является амфибол с максимальными содержаниями калия. В океанических габброидах это условие соблюдается только для наиболее высокотемпературной роговой обманки (K_2O до 0,50 масс.%) [Silant'ev, 1998; Silant'ev et al., 1995], поэтому чем выше степень метаморфизма в габброиде, тем более благодарным объектом для датирования он является. Некоторые разновидности габбро САХ и ассоциирующие с ними гранитоиды содержат флогопит, который также удовлетворяет требованиям К-Аг датирования, но, к сожалению, эта фаза в изученных породах достаточно редка и ее выделение связано с трудностями. В целом, очевидно, что ближайшая перспектива применения метода К-Аг датирования для пород океанического субстрата тесно связана с развитием методов точечного анализа (например, метод лазерной абляции).

5. Интерпретация данных изотопного датирования

Результаты проведенного исследования позволяют сделать ряд принципиальных выводов, имеющих прямое отношение к сформулированной ранее проблеме вещественной неоднородности строения океанической литосферы в гребневой зоне САХ в районе 13–17° с.ш. [Silant'ev, 1998; Silant'ev et al., 1995] и свидетельствующих о возможной возрастной неоднородности океанического субстрата, проявленной вблизи оси спрединга.

Данные, приведенные в табл. 1, указывают на возможность существования возрастной асимметрии в

однотипных комплексах пород, слагающих противоположные борта рифтовой долины САХ между 15 и 16° с.ш. (рис. 1). Результаты датирования демонстрируют, что возраст гнейсовидных габбро восточного борта долины более чем в два раза превышает возраст габброидов с теми же вещественными характеристиками с западного борта. В случае габброидов, представленных обр. FR12-05, при обсуждении и интерпретации полученных результатов предпочтение, очевидно, следует отдать возрастной оценке, полученной для этого образца в ИГЕМ РАН, как более достоверной.

Как следует из приведенного выше обсуждения влияния на оценки К-Аг возраста пород океанической коры эндогенных и экзогенных факторов, избыточный мантийный аргон предпочтительно концентрируется в плохо раскристаллизованных продуктах магматизма САХ, с другой стороны, процессы подводного выветривания, обуславливают потерю радиогенного аргона в океанском субстрате и привнос в него калия, что определяет систематическое занижение измеренного для этих пород К-Аг возраста. Изученные образцы представлены полнокристаллическими габбро и лишены признаков низкотемпературного изменения (в них отсутствуют смектиты и другие глинистые минералы), поэтому ни один из перечисленных выше факторов не мог влиять на измеренный в них возраст. Поскольку главные породообразующие минералы в датированных габброидах представлены плагиоклазом, пироксеном и амфиболом, оценки возраста, полученные в настоящем исследовании по валовой пробе, могут рассматриваться как достаточно надежные, так как эти фазы, согласно [Faure, 1986], характеризуются хорошей способностью к удержанию аргона. О том же свидетельствует совпадение возрастов, определенных К-Аг методом для гнейсовидных амфиболитов разлома Вима по амфиболу, плагиоклазу и валовой пробе [Honnorez et al., 1984]. К этому следует добавить, что содержание калия в изученных породах составляет не менее 0,25–0,27 масс.%, и, таким образом, удовлетворяет требованиям К-Аг метода.

Поскольку магматические и метаморфические процессы, участвующие в аккреции океанической литосферы, судя по петрологическим данным, протекают в масштабе геологического времени почти одновременно [Silant'ev, 1998], принципиально важно оценить влияние этих процессов на К-Аг возрастные оценки.

В некоторых образцах габброидов станции FR16 были зафиксированы магматические контакты с рвущими их гранитоидами трондъемитового ряда, что позволяет рассматривать последние как жильные образования. Трондъемиты содержат ксенолиты перекристаллизованных габброидов, а вме-

щающие габбро (в том числе представленные обр. FR16-02) содержат биотит, по составу идентичный присутствующему в трондъемитах. К этому следует добавить, что биотит-содержащие гнейсовидные габбро, также как интродуцирующие их трондъемиты, обнаруживают существенное обогащение ЛРЗЭ. Таким образом, имеются четкие петрографические и геохимические свидетельства высокотемпературной перекристаллизации габброидов со станции FR16 в результате их взаимодействия с трондъемитовым расплавом. В реконструкции главных этапов магматической истории сегмента САХ, расположенного к северу от разломной зоны $15^{\circ}20'$, трондъемиты рассматриваются как наиболее поздние магматические образования западного борта рифтовой долины в этом районе [Silant'ev, 1998]. Поскольку потери аргона в кристаллическом субстрате могут быть обусловлены частичным плавлением и перекристаллизацией, возрастная оценка, полученная для гнейсовидного габброида станции FR16, возможно, отражает время магматического взаимодействия этой породы с поздними, относительно времени формирования габброидного комплекса, инъекциями трондъемитового расплава. Иными словами, возраст 3,5 млн лет характеризует время магматической кристаллизации трондъемитового жильного комплекса. В рамках такой интерпретации, возраст, определенный для образца FR12-05 должен соответствовать или времени его кристаллизации в магматической системе, или перекристаллизации при метаморфизме.

В обоих исследованных образцах отмечена частичная метаморфическая перекристаллизация первичных магматогенных фаз с образованием амфибола или редкого хлорита. Клинопироксен в габброидах нередко почти полностью, часто псевдоморфоно, замещается амфиболом, в то время как ортопироксен замещен той же фазой только по краям зерен. Хлорит, являясь наиболее поздней вторичной фазой, частично замещает как темноцветные минералы (включая амфибол), так и плагиоклаз. Параметры состава амфибола из изученных образцов указывают на то, что метаморфическая перекристаллизация этих пород происходила при участии флюида морского происхождения и температурах порядка $500\text{--}550^{\circ}\text{C}$. На основании петрологических данных, приведенных в [Silant'ev, 1998], было высказано предположение, что метаморфизм габброидов в рассмотренном сегменте САХ протекал в малоуглубленных условиях, а подъем плутонических образований к поверхности океанического дна осуществлялся с большей скоростью. Из последнего допущения следует, что если метаморфогенные фазы существенно повлияли на полученную оценку К-Аг возраста в валовых пробах габброидов станций FR16 и FR12, то, по крайней мере, в случае образца FR12-05 из-

меренный возраст отвечает метаморфической перекристаллизации габбро на уровне глубинности корового разреза, соответствующего 2–2,5 км, и не связан с низкотемпературными процессами. Возможно, этот возраст – 9 млн лет, близок ко времени магматической консолидации габброидного комплекса сегмента САХ к северу от разломной зоны $15^{\circ}20'$, так как наиболее высокотемпературным этапам метаморфизма слагающих его пород соответствовали температуры, отвечающие субсолидусным условиям [Silant'ev, 1998]. Резюмируя сведения о метаморфической истории габброидов рассмотренного участка САХ и анализируя характер распределения условий метаморфизма в этом районе, можно констатировать, что установленная возрастная асимметрия противоположных бортов рифтовой долины, проявленная в однотипных габброидах, не связана с различиями в метаморфической эволюции этих пород, поскольку им свойственна одинаковая степень метаморфизма.

Приведенные выше соображения позволяют высказать предположение, что возрастные различия между габброидами рассмотренного сегмента САХ обусловлены, главным образом, разной магматической историей становления плутонического комплекса восточного и западного борта рифтовой долины. Очевидно также, что поздние инъекции трондъемитов, несмотря на их относительно молодой возраст, тем не менее не связаны с современным магматизмом рифтовой долины (так называемый “zero age magmatism”). Для гребневой зоны САХ в районе $13\text{--}17^{\circ}$ скорость спрединга по [Галушкин, Ушаков, 1978] составляет около 2,8 см/год. Следовательно, для океанического субстрата с возрастом 3,5 млн лет следует ожидать его удаление от оси спрединга на расстояние порядка 100 км, в то время как станция FR16 удалена от оси рифтовой долины не более, чем на 5 км. В свою очередь, габброид станции FR12 тем более не может рассматриваться как плутонический аналог современных базальтов рифтовой долины, так как измеренный для него возраст, при указанных скоростях спрединга требует удаления подобного корового субстрата от оси рифтовой долины на дистанцию не менее 250 км. На еще большем удалении от оси хребта, по тем же соображениям, должны находиться породы с возрастом 20 млн лет – 560 км.

Указанное противоречие между К-Аг возрастом пород, слагающих борта рифтовой долины, и их интерпретацией, основанной на геодинамических постулатах канонической модели спрединга, может свидетельствовать о несовершенстве последней, по крайней мере, применительно к рассмотренному сегменту САХ. Возрастные оценки, полученные в настоящей работе, дают основания предполагать,

что магматизм в рифтовой долине САХ между 15 и 16° с.ш. имеет пульсационный характер и соответствует интервалу времени, значительно превышающему длительность формирования главных структурных элементов рифтовой долины, предсказанную расчетными методами.

Результаты изучения мантийных перидотитов из разломной зоны Вима (10° с.ш.), участвующих в строении фрагмента океанической коры, удаленного от оси САХ на расстояние около 300 км и имеющего модельный возраст почти 20 млн лет, продемонстрировали, что этим породам свойственны существенные вариации в составе и степени плавления, свидетельствующие о систематическом изменении термальной структуры мантии под САХ во временном интервале, охватывающем по меньшей мере 10 млн лет [Brunelli et al., 1999]. Приведенные в цитируемой работе данные могут рассматриваться как подтверждение высказанного выше предположения о пульсационном характере плавления мантии под гребневой зоной хребта.

В контексте проблемы возрастных и вещественных соотношений магматических комплексов гребневой зоны САХ правомочен вопрос об источнике трондjemитового расплава, внедрившегося в габброиды станции FR16. В этой связи важно подчеркнуть, что сегменты САХ, в пределах которых широко распространены обнажения мантийных реститов и плутонических пород, в настоящее время во многих работах [Brunelli et al., 1999; Silant'ev, 1998; Xia et al., 1992] рассматриваются как амагматичные из-за редуцированности или даже отсутствия в этих регионах базальтового слоя. Рисунок 1 наглядно демонстрирует, что рассмотренный в настоящей работе сегмент САХ может быть по праву отнесен к подобным участкам хребта с низким магматическим бюджетом. Следует заметить, что возрастное несоответствие между изученными плутоническими породами и современным базальтовым магматизмом рифтовой долины, возможно является универсальным качеством амагматичных сегментов хребта, поскольку ультраосновные реститы, согласно оценке, приведенной в [Bazylev and Silant'ev, 2000] обнажаются на океаническом дне в среднем через $1,4 \pm 0,5$ млн лет после отделения от них расплава.

Очевидно также, что установленный феномен присутствия в амагматичных сегментах САХ разновозрастных плутонических комплексов свидетельствует о вовлечении в процессы плавления под гребнем хребта магматических источников, не связанных с нормальными мантийными резервуарами, продуцирующими расплавы, родоначальные для современных MORB. Можно также предположить, что амагматичные сегменты САХ характеризуются сверх низкими скоростями спрединга, с чем согласу-

ются приведенные выше данные. Возможным кандидатом на роль подобных магматических источников являются линзы и жильные тела габброидов, раскристаллизованных в условиях верхней мантии. На возможность глубинной кристаллизации габбро под САХ указывают находки в его гребневой зоне мантийных реститов, содержащих габброидные жилы и дайки [Базылев и др., 1999; Cannat et al., 1992]. Из экспериментальных данных о частичном плавлении толеитового субстрата следует, что при высоких давлениях, относительно низких температурах и низком парциальном давлении воды в этой системе могут выплавляться трондjemиты [Winther, 1996]. Плавление габброидного материала в условиях верхней мантии непротиворечиво объясняет образование трондjemитового расплава, интродуцировавшего гнейсовидные габбро станции FR16.

Интерпретация всех имеющихся данных по К-Аг датированию плутонических пород гребневой зоны САХ была бы неполной без обсуждения полученных разными авторами (см. выше) очень древних возрастов габброидов Центральной Атлантики. В работе [Трухалев и др., 1990] древний возраст метагаббро и фрагмента плагиогранита, датируемых в САХ на 26° с.ш. интерпретируется как свидетельство возможного присутствия реликтов древнего корового субстрата, сформированного задолго до раскрытия современного бассейна Атлантического океана. Это предположение совпадает с точкой зрения М. Озимы с коллегами [Ozima et al., 1976] на тектоническую позицию изученных ими метабазальтов из зоны пресечения САХ и разлома Атлантик, по которой происхождение этих древних вулкаников (^{40}Ar - ^{39}Ar метод, 169 млн лет) связано с начальными этапами раскрытия Центральной Атлантики, а в формировании их изотопно-геохимических характеристик принимало участие вещество древней (доатлантической) литосферы. Прогресс в изотопно-геохимических исследованиях продуктов магматизма САХ, наметившийся в последнее десятилетие, предоставил новые данные, которые позволяют вернуться к упомянутой выше интерпретации древнего возраста некоторых представителей магматических комплексов в гребневой зоне САХ. Анализ изотопно-геохимических особенностей базальтов САХ между 31 и 41° с.ш., предпринятый в [Dosso et al., 1999], продемонстрировал существование вещественной гетерогенности мантийных источников этих пород, которая возможно была сформирована до открытия бассейна современной Атлантики и является унаследованной от литосферы древнего суперконтинента Гондвана. В работе [Dosso et al., 1999] приводятся оценки изотопного возраста главных этапов магматической истории мантийных источников под САХ между 31 и 41° с.ш., которые соответствуют времен-

ному интервалу 100–300 млн лет и близки к возрасту, приведенному в [Ozima et al., 1976].

Существуют независимые свидетельства участия фрагментов древней литосферы в аккреции океанской коры гребневой зоны САХ, вытекающие из изотопно-геохимических особенностей мантийных перидотитов, добытых из сегментов хребта с корой Хэссовского типа. Изотопные характеристики Sm и Nd в различной степени деплетированных мантийных перидотитов сегмента САХ, расположенного к северу от разломной зоны 15°20', позволил предположить [Силантьев, Беляцкий, 1998], что эти породы испытали плавление 1,5 млрд лет т.н., что хорошо согласуется с установленным в [Silant'ev et al., 1995] феноменом генетического несоответствия мантийных реститов из того же района с продуктами современного магматизма рифтовой долины.

Таким образом, можно предполагать присутствие в гребневой зоне САХ двух типов магматических комплексов, не соответствующих в возрастном отношении современному магматизму рифтовой долины: 1) локализованного в сегментах с корой Хэссовского типа со сверх низкими скоростями спрединга и связанного с повторным плавлением в мантийных условиях линз и прослоев кумулятивных пород, часто с аномальными геохимическими характеристиками; 2) представленного реликтами литосферы суперконтинента Гондвана и характеризующегося изотопным возрастом порядка сотен миллионов лет.

Благодарности. Исследования по рассмотренной проблеме были поддержаны грантом РФФИ 98-05-64212 и Министерством Науки и Технологий РФ – проект “Ключевые районы Срединно-Атлантического хребта (САХ)”.

Литература

- Базылев Б. А., Силантьев С. А., Краснов С. Г., Ассоциация перидотитов из зоны геохимической аномалии 14°48' с.ш. Срединно-Атлантического хребта: новые черты океанического магматизма, *ДАН*, 366, (4), 515–518, 1999.
- Беляцкий Б. В., Левский Л. К., Трухалев А. И., Погребницкий Ю. Е., Васильева И. М., Куренцова Н. А., Докембрийский гранито-гнейс в Срединно-Атлантическом хребте (26° с.ш.): результаты U-Pb и Sm-Nd изотопных исследований, *Геохимия*, 8, 876–880, 1997.
- Галушкин Ю. И., Ушаков С. А., Глобальная картина мгновенной кинематики литосферных плит, *Вестник Моск. Ун.-та, Сер. геол.*, 2, 20–34, 1978.
- Силантьев С. А., Беляцкий 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 геохи-
- мии изотопов им. академика А. П. Виноградова, тезисы докладов, с. 260–261, Москва, 1998.
- Сколотнев С. Г., Ляпунов С. М., Симонов В. А., Кумулятивные породы, В *Строение зоны разлома Зеленого Мыса: Центральная Атлантика*, Под ред. Ю. М. Пущаровского, 195 с., Наука, Москва, 1989.
- Трухалев А. И., Силантьев С. А., Куренцова Н. А., Одинокоев Ю. Ю., Удинцев Г. Б., Колосов О. И., Федоров И. П., Ленников А. М., Васильева И. М., Друбецкой Е. Р., Древний К-Аг возраст метагаббро и гранито-гнейса, драгированных в осевой части Срединно-Атлантического хребта, 26° с.ш., *ДАН*, 311, 1447–1453, 1990.
- Чернышев И. В., Иваненко В. В., Карпенко М. И., ³⁹Ar-⁴⁰Ar метод датирования: контроль возможных потерь ³⁹Ar, вызываемых нейтронным облучением пробы, *Геохимия*, 3, 248–252, 1996.
- Aumento F. and Loncarevic B. D., The Mid-Atlantic Ridge near 45°N, III. Bald Mountain, *Canad. J. Earth Sci.* 6, 11–23, 1969.
- Bazylev B. A. and Silant'ev S. A., Geodynamic Interpretation of the Subsolidus Recrystallization of Mantle Spinel Peridotites: 1. Mid-Ocean Ridges, *Petrology*, 8, (3), 201–213, 2000.
- Brunelli D., Cipriani A., Ottolini L. and Bonatti E., Vema Fracture Zone (Central Atlantic): Temporal Variations of Mantle Composition and of Accretion Processes at Ridge Axis, European Union of Geosciences, Strasbourg, Cambridge Publications, Journal of Conference Abstracts, 387 p., 4 (1), 1999.
- Cannat M., Bideau D. and Bougault H., Serpentinized peridotites and gabbros in the Mid-Atlantic Ridge axial valley at 15°37' N and 16°52' N, *Earth and Planetary Science Letters*, 109, 87–106, 1992.
- Cannat M. and Casey J. F., An ultramafic lift at the Mid-Atlantic Ridge: Successive stages of magmatism in serpentinized peridotites from the 15°N region, in: *Mantle and lower crust exposed in oceanic ridges and in ophiolites*, Vissers R. L. M. & Nicolas A. (Eds.), pp. 5–34, Kluwer Acad. Publ., 1995.
- Clague D. A., Dalrymple G. B. and Moberly R., Petrography and K-Ar ages of dredged volcanic rocks from the western Hawaiian Ridge and the southern Emperor Seamount Chain, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, 991–998, 1975.
- Dalrymple G. B. and Moore J. G., Argon-40: Excess in submarine pillow basalts from Kilauea Volcano, Hawaii, *Science*, 161, 1132–1135, 1968.
- Dalrymple G. B. and Clague D. A., Age of the Hawaiian-Emperor bend, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 31, 313–329, 1976.
- Dalrymple G. B., Lanphere M. A. and Clague D. A., Conventional and ⁴⁰Ar/³⁹Ar K-Ar ages of volcanic rocks from the Ojin (site 430), Nintoku (site 432), and Suiko (site 433) seamounts and the chronology of volcanic propagation along the Hawaiian-Emperor chain, *Deep Sea Dril. Proj., Initial Rep.*, 55, 659–676, 1980.
- 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.

- Dymond J., Excess argon in submarine basalt pillows, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 1229–1232, 1970.
- Faure G., Principles of Isotope Geology, John Wiley & Sons, 520 p., New York, 1986.
- Funkhouser J. G., Fisher D.E. and Bonatti E., Excess argon in deep-sea rocks, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 5, 95–100, 1968.
- Honnorez J., Mevel C. and Montigny R., Occurrence and significance of gneissic amphibolites in the Vema Fracture Zone, Equatorial Mid-Atlantic Ridge, *J. Geophys. Res.* 89, 11,379–11,400, 1984.
- Noble C. S. and Naughton J. J., Deep-ocean basalts: Inert gas content and uncertainties in age dating, *Science*, 162, 265–267, 1968.
- Ozima M., Saito K., Zashu S., et al., Additional evidence of existence of ancient rocks in the Mid-Atlantic Ridge and the age of the opening of the Atlantic, *Tectonophysics*, 31, 59–73, 1976.
- Pilot J., Werner C.-D., Haubrich F. and Baumann N., Palaeozoic and Proterozoic zircons from the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, 393, 676–679, 1998.
- Reynolds P. H. and Clay W., Leg 37 basalts and gabbro: K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, in: *Initial Report of the Deep Sea Drilling Project 37*, 629–631, 1977.
- Seidemann D. E., Effects of submarine alteration on K-Ar dating of deep-sea igneous rocks, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, 1660–1666, 1977.
- Seidemann D. E., $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ studies of deep-sea igneous rocks, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 1721–1734, 1978.
- 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., Dmitriev L. V., Bazylev B. A., Casey J. F., Bougault H., Levsky 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, 1995.
- 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.
- Stuart F. M. and Turner G., Mantle-derived ^{40}Ar in mid-ocean ridge hydrothermal fluids: implications for the source of volatiles and mantle degassing rates, *Chemical Geology*, 147, 77–88, 1998.
- Walker D. A. and McDougall I., $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar dating of altered glassy volcanic rocks: The Dabi Volcanics, P.N.G., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 2181–2190, 1982.
- Winther K. T., An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts, *Chemic. Geol.*, 127, 43–59, 1996.
- Xia C., Casey J. F., Silant'ev 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, 1992.

(Поступила в редакцию 16 ноября 2000.)