

Три фундаментальных феномена, определяющих строение современной литосферы Срединно-Атлантического хребта

С.А. Силантьев

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

Процессы аккреции океанической литосферы в Срединно-Атлантическом хребте (САХ) отражены в трех фундаментальных феноменах, определяющих строение современной литосферы САХ и других медленно-спрединговых срединно-океанических хребтов (СОХ). К этим природным феноменам относятся геохимическая сегментация осевой зоны хребта (1), внутренние океанические комплексы (2), и гидротермальные кластеры (3), которые, являясь наиболее характерными атрибутами Срединно-Атлантического хребта (САХ), связаны между собой и отражают взаимодействие магматических и гидротермальных систем, действующих в осевой зоне хребта.

1. Геохимическая сегментация. Обнаружение признаков Геохимической сегментации, проявленной в базальтовом слое осевой зоны САХ (*Schilling et al.*, 1983; *Klein, Langmuir*, 1987; *Bougault et al.*, 1988; *Дмитриев*, 1998; *Dosso et al.*, 1999), стимулировало исследования, направленные на выяснение природы мантийных резервуаров, генерирующих базальтоиды MORB. Существующие данные позволяют полагать, что геохимическая сегментация САХ проявлена не только в базальтах рифтовой долины, но и в ассоциирующих с ними мантийных перидотитах (*Silantyev et al.*, 1995; *Силантьев*, 2003). Характер распределения индикаторных геохимических параметров в закалочных стеклах MORB вдоль простирания оси САХ (например, K_2O/TiO_2) отражает чередование геохимически аномальных его сегментов с сегментами развития преимущественно базальтоидов семейства N-MORB. В то же время, распределение вдоль оси САХ петролого-геохимических параметров ассоциирующих с базальтами мантийных перидотитов (например, $Cr\#$ в шпинели) согласуется с вещественной сегментацией хребта, проявленной в MORB. Очевидно, геохимическую сегментацию САХ определяют следующие возможные факторы: степень плавления мантийного источника родительских для MORB расплавов; вещественная неоднородность мантийного субстрата; и смешение различных в геохимическом отношении расплавов. Вдоль простирания САХ на всем его протяжении в пределах северного полушария имеет место чередование сегментов с мощным базальтовым слоем и сегментов, в которых базальтовый слой редуцирован, а океаническая кора относится к Хессовскому типу (сложена преимущественно породами габбро-перидотитовой ассоциации) (например, *Klein, Langmuir*, 1987; *Bougault et al.*, 1988; *Dosso et al.*, 1999; *Gracia et al.*, 1998; *Silantyev et al.*, 2001). Несмотря на соответствие в оценках степени плавления, полученных для ассоциирующих базальтовых стекол и мантийных реститов, в некоторых районах САХ имеет место явное противоречие между реальным строением корового разреза и мощностью базальтового слоя, определенного геохимическими методами. Проявления базальтового вулканизма здесь редуцированы, а мантийные реститы являются резко преобладающим типом пород фундамента. Одним из наиболее правдоподобных объяснений этого несоответствия может быть захват базальтового расплава в субстрате малоглубинной мантии, что подтверждается присутствием в мантийных перидотитах этих участков осевой зоны САХ жильных и дайковых тел габбро. Вариации вдоль оси САХ геохимических особенностей базальтов свидетельствуют о признаках смешения родоначальных для E- и N-MORB расплавов, которые определяют особенности состава продуктов вулканизма переходных зон между аномальными и нормальными сегментами САХ. В районах САХ, где разрез коры соответствует Хессовскому типу, установлены признаки перекристаллизации мантийных перидотитов при их взаимодействии с проникающими сквозь них расплавами. Изотопно-геохимические особенности перидотитов САХ могут свидетельствовать также в пользу представлений о гетерогенности мантийного субстрата под осевой зоной хребта: здесь присутствуют две главные группы мантийных перидотитов. Перидотиты первой группы генетически соответствуют ассоциирующим с ними базальтам. Мантийные реститы из второй группы характеризуются отсутствием изотопной генетической связи с продуктами базальтового магматизма рифтовой долины северного САХ. Мантия под рифтовой долиной САХ

сегментирована и неоднородна не только в геохимическом, но и в реологическом отношении. Существует устойчивая корреляция между петролого-геохимической сегментацией океанической коры в осевой зоне САХ и реологической сегментацией мантии под САХ (Силантьев, Соколов, 2010). Характер наблюдаемых корреляций между признаками реологической и петролого-геохимической сегментаций САХ свидетельствует о том, что в осевой зоне САХ реализуются два главных геодинамических сценария: 1) формирование в «горячих» сегментах САХ нормальной базальтовой коры за счет плавления малоглубинной мантии с характеристиками DM при участии в процессах петрогенезиса вещества латеральных плюмовых потоков; 2) Образование в «холодных» сегментах САХ коры Хессовского типа, в строении которой возможно принимают участие представители мантийного субстрата, не вовлекавшегося в современный магматизм рифтовой долины.

2. Внутренние океанические комплексы (ВОК). Формальное определение внутреннего океанического комплекса приводится в (MacLeod et al., 2009) и выглядит следующим образом: “Внутренние океанические комплексы (Oceanic core complexes) являются блоками глубинных пород, поднятых вдоль пологих разломных зон, которые выводят на поверхность морского дна медленно-спрединговых хребтов нижне-коровые и мантийные породы”. Специфика строения литосферы медленно-спрединговых хребтов стала очевидной уже в 80-90 годы прошлого века, при анализе распространения районов опробования гребневой зоны САХ, в которых были подняты перидотиты. Данные, полученные в последнее десятилетие позволяют полагать, что центральная часть амагматичных сегментов медленно- и ультра-медленно спрединговых СОХ сложена преимущественно массивами габбро, кое-где перекрытых маломощными пиллоу-лавами, в то время как в краевых частях этих сегментов широко распространены серпентинизированные перидотиты (Dick et al., 2008). Было установлено также, что обширные (до 200 км²) обнажения мантийных перидотитов могут присутствовать в обоих бортах рифтовой долины САХ (Cannat et al., 1992; Silant'ev et al., 1998). Внутренние океанические комплексы являются ключевым объектом в реконструкции последовательности магматических, метаморфических и гидротермальных событий, сопровождающих аккрецию океанической коры в медленно-спрединговых СОХ. Важнейшая особенность ВОК заключается в тесных соотношениях между слагающими их породами: жильный комплекс габбро в перидотитах, жильный комплекс плагиогранитов в габбро и перидотитах. История эксгумации ВОК к поверхности океанического дна записана в проявлениях метаморфизма, установленных во всем спектре слагающих ВОК пород и отражающих регрессивный тренд, соответствующий тектонической и вещественной эволюции корово-мантийного субстрата по мере его подъема под осевой зоной СОХ. Главным агентом метаморфизма океанического типа является флюид морского происхождения, вариации состава которого обусловлены составом вмещающих пород, температурой и величиной W/R (вода/порода). Реконструкция главных этапов эксгумации мантийных перидотитов океанического фундамента напрямую связана с количественной оценкой физико-химических параметров вещественной эволюции мантийных перидотитов, которая позволяет очертить всю траекторию океанического мантийного диапиризма, начиная с уровней малоглубинной мантии до поверхности океанического дна. Результаты синтеза расчетных и эмпирических данных позволяют выделить для широкого диапазона температур и величин отношения W/R следующие характерные минеральные фации гидротермально измененных перидотитов медленно-спрединговых СОХ: I. арагонит-гетит-сапонитовую (T^oC = 20 - 60) ; II. хризотил-гематит-пиритовую (T^oC = 60 - 130); III. хризотил-магнетит-пирротиную (T^oC = 130 - 260); IV. антигорит-тремолит-магнетит-пирротиную (T^oC = 260 - 420); и V. тальк-тремолит-оливин-магнетит-пирротиную (T^oC = 420 - 480) (Силантьев и др., 2009). Согласно качественной схеме эволюции флюидного режима на различных уровнях глубинности нисходящей ветви гидротермальной системы в перидотитовом субстрате, приведенные минеральные ассоциации соответствуют следующим типам флюидного режима, характерным для коры медленно-спрединговых хребтов: I – зона резко-окислительного (флюидо-доминирующего) режима, II – зона умеренно-окислительного режима и III-V – зона восстановительного (породо-доминирующего) режима. Образование океанических плагиогранитов (ОПГ) – является промежуточным звеном между гидротермальным и магматическим процессами, формирующими облик ВОК. Плутонические комплексы САХ, содержащие жильные тела ОПГ, расположены в районах осевой зоны хребта, где установлены активные гидротермальные поля.

Ярким примером подобной закономерности является крупный гидротермальный кластер, включающий гидротермальные поля Ашадзе, Семенов и Логачев (САХ между 12° и 17° с.ш.). Практически все имеющиеся образцы ОПГ, отобранные в осевой зоне САХ, обнаруживают повышенные относительно ДММ значения отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Величина этого отношения является чутким индикатором степени изменения пород океанической коры при их взаимодействии с морской водой и ее флюидными дериватами. Поэтому наблюдаемое в ОПГ обогащение радиогенным стронцием указывает на то, что в их формировании принимал участие компонент, представленный гидротермальным флюидом морского происхождения. Имеющиеся эмпирические и экспериментальные данные позволяют предполагать, что жильные гранитоиды, участвующие в строении ВОК Атлантики, являются продуктом частичного плавления вмещающих пород (габбро/перидотиты) при участии высокотемпературного водно-солевого флюида по механизму «гидротермального анатексиса». Особенности генезиса плагиогранитов САХ возможно отражают фундаментальную особенность аккреции океанической литосферы: практически одновременное в масштабах геологического времени протекание экзогенных (нептунических) и эндогенных (плутонических) процессов.

3. Гидротермальные кластеры. Крупным достижением отечественных исследований, связанных с картированием и изучением рудопроизводящих систем СОХ и процессов, контролируемых их образованием и эволюцией, явилось обнаружение серии крупных гидротермальных рудопрооявлений, образующих своеобразную гирлянду, простирающуюся вдоль оси Срединно-Атлантического хребта от 12°58'с.ш. до 15°с.ш. Недавнее открытие гидротермального поля Семенов, расположенного между известными полями Ашадзе (12°58'с.ш.) и Логачев (14°45'с.ш.), позволяет уверенно считать, что кластеры гидротермальных полей являются обычным элементом строения фундамента САХ в Центральной Атлантике. На геохимическую специфику гидротермальных систем СОХ влияет тип корового разреза, к которому они относятся: Хессовский (перидотитовый) или Пенроузский (базальтовый). Вдоль всего простираения осевой зоны САХ в северном полушарии чередуются нормальные сегменты хребта (Пенроузская кора) с аномальными сегментами (Хессовская кора). В соответствии с этой закономерностью гидротермальные поля САХ образуют два семейства: расположенные в базальтовом субстрате (Брокен Спур, Снейк Пит, ТАГ, Лаки Страйк) и в перидотитовом - (Ашадзе, Семенов, Логачев, Лост Сити, Рейнбоу). Таким образом, существует несомненная связь между гидротермализмом САХ и его вещественной сегментацией. Гидротермальные поля САХ, связанные с базальтовым субстратом, локализованы в областях поверхностных тепловых аномалий, маркирующих активный базальтовый вулканизм рифтовой долины. Гидротермальные поля, расположенные в серпентинитах, локализуются внутри «холодных» сегментов САХ, характеризующихся аномальным в геохимическом отношении магматизмом (аномалия «14°48'», Азорский плюм). Из этой особенности распределения двух различных типов гидротермальных полей вдоль оси САХ следует важный вывод о том, что формирование гидротермальных систем, связанных с базальтовым субстратом, происходит в обстановке остывающей литосферы, в то время как гидротермальные системы, расположенные в серпентинитах, образуются при нагреве холодной литосферы. В строении внутренних океанических комплексов САХ, вмещающих гидротермальные поля, принимают участие мантийные рестины, резко различающиеся по изотопно-геохимическим характеристикам. Возможно, области осевой зоны САХ, в которых пространственно совмещены контрастные в петролого-геохимическом отношении внутренние океанические комплексы, служат ареной развития крупных гидротермальных кластеров со значительным рудным потенциалом.

4. Процессы, определяющие вещественную сегментацию САХ и формирование ВОК и гидротермальных кластеров. На рис. 1 схематически представлен весь спектр процессов, участвующих в формировании современной океанической литосферы и намечены связи между этими процессами и тремя рассмотренными в настоящем докладе фундаментальными особенностями САХ. Очевидно, что история эволюции литосферы САХ наиболее полно записана в породах, слагающих внутренние океанические комплексы. В (Силантьев и др., 2009) была предложена геодинамическая модель формирования ВОК Срединно-Атлантического хребта, в которой учитываются основные этапы вещественной и тектонической эволюции коры Хессовского типа. Согласно этой модели, принимается, что серпентинизация мантийных перидотитов на

уровне глубинности коры порядка 3.5-4.5 км. приводит к образованию корового субстрата, обладающего избыточным объемом по сравнению с исходными свежими мантийными породами. Вследствие этого серпентиниты испытывают подъем в верхние коровые горизонты, который вызывает разрывные нарушения в жесткой и холодной литосфере медленно-спредингового хребта. Возникающая при этом система разломов срыва ("detachment fault") дренирует нижнекоровые магматические камеры и провоцирует внедрение малоглубинных интрузий габбро. В результате этого внутри перемещенной к поверхности океанического дна серпентинитовой пластины создаются условия, благоприятные для «запуска» гидротермальной циркуляционной системы.



Рис. 1. Три фундаментальных феномена, определяющих строение современной литосферы Срединно-Атлантического хребта и их связь с процессами в гребне хребта.

Таким образом, три рассмотренных фундаментальных феномена, определяющих строение современной литосферы Атлантики, являются ярким свидетельством специфических условий петрогенезиса в САХ, которые заключаются в практически одновременном протекании магматического и гидротермального процессов в осевой зоне хребта и в их тесном взаимодействии. В этом контексте физико-химические процессы, связанные с геологической эволюцией системы мантия-кора-гидросфера в Срединно-Атлантическом хребте, служат отличной иллюстрацией мысли Д.С. Коржинского, высказанной им в (Коржинский, 1962): «Специфика и сложность природных физико-химических процессов по сравнению с лабораторными заключается прежде всего в том, что они протекают в открытых системах, при широком вещественном взаимодействии с внешней средой».

Литература:

- Дмитриев Л.В.* Вариации состава базальтов срединно-океанических хребтов как функция геодинамической обстановки их формирования // Петрология. 1998. Т.6. № 4. С. 340-362
- Коржинский Д.С.* Теория процессов минералообразования // III Чтения им. В.И. Вернадского, Издательство АН СССР, 1962, 22 с.
- Силантьев С.А., Соколов С.Ю.* Влияние реологической гетерогенности мантии под осевой зоной Срединно-Атлантического хребта на изотопно-геохимические параметры магматизма и распределением гидротермальных рудопроявлений // Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования. Материалы научной конференции 2010, с.155.
- Силантьев С.А., Мироненко М.В., Новоселов А.А.* Гидротермальные системы в перидотитовом субстрате медленно-спрединговых хребтов. Моделирование фазовых превращений и баланса вещества: Нисходящая ветвь // Петрология, 2009, Т. 17, №2, с. 154–174.
- Силантьев С.А.* Вариации геохимических и изотопных характеристик реститовых перидотитов вдоль простирания Срединно_Атлантического хребта как отражение природы мантийных источников магматизма // Петрология. 2003. Т. 11. № 4. С. 339–362.
- Силантьев С.А.* Условия формирования плутонического комплекса Срединно-Атлантического хребта, 13°-17°с.ш. // Петрология, 1998, т.6, N 4, с.381-421.
- Bougault H., Dmitriev L., Schilling J.-G., et al.* Mantle heterogeneity from trace elements: MAR triple junction near 14°N // Earth Planet. Sci. Lett. 1988. V. 88. P. 27-36.
- Cannat M., Bideau D., Bougault H.* Serpentinized Peridotites and Gabbros in the Mid- Atlantic Ridge Axial Valley at 15°37'N and 16°52'N // Earth Planet Sci Lett. 1992. V.109. P. 87-106.
- Dick H.J.B., Tivey M.A., Tucholke B.* 2008. Plutonic foundation of a slow-spreading ridge segment: oceanic core complex at Kane Megamullion, 23°30'N, 45°20'W // Geochem. Geophys. Geosyst., 2008, 9, Q05014
- Dosso L., Bougault H., Langmuir C. et al.* The age and distribution of mantle heterogeneity along the Mid-Atlantic Ridge (31° – 41°N) // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 170. P. 269-286.
- Gracia E., Parson L.M., Bideau D., 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, 1998, Geological Society, London, Special Publication, 148, 1-15.
- Klein E.M., Langmuir C.H.* Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness // J. Geophys. Res. 1987. V.92. P. 8089-8115.
- MacLeod C., J., Searle R.C., Murton B.J., Casey J.F., Mallows C., Unsworth S.C., Achenbach K.L., Harris M.* Life cycle of oceanic core complexes // Earth Planet. Sci. Letters, 2009, V.287 PP. 333–344.
- Schilling J.-G., Zajac M., Evans R. et al.* Petrologic and geochemical variations along the Mid-Atlantic Ridge from 27°N and 73°N // Am. J. Sci. 1983. V. 283. P. 510-586.
- Silant'ev S.A., Belyatsky B.V., Beltenev V.E. et al.* The distribution of isotope signatures in MAR peridotites between 12° and 36°N and two main kinds of mantle substratum bellow ridge axis // InterRidge News. 2001. V. 10. № 2. P. 27-33.
- Silant'ev S.A., Dmitriev L.V., Bazylev B.A., et al.* 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. 1995. V. 4. P. 18-21.