

МАНТИЙНЫЙ ДИАПИРИЗМ В ЗОНАХ КОНВЕРГЕНЦИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ (Японское море)

Ю.А. Мартынов, В.В. Голозубов, А.И. Ханчук

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
690022, Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159, Россия

Новая геологическая и изотопно-геохимическая информации по вулканизму Восточного Сихотэ-Алиня и ранее опубликованная по Японскому морю позволяют лучше понять процессы, связанные с формированием окраинно-морского бассейна, и их место в общей тектономагматической истории развития континентальной окраины.

Главной особенностью кайнозойского этапа развития территории является активизация правосторонних сдвиговых перемещений, которые начиная с эоцена происходили вне видимой связи с субдукционной тектоникой. Эти перемещения привели к прекращению позднемеловой субдукции, разрыву субдукционной пластины, формированию астеносферных окон и внедрению в субконтинентальную мантию океанической астеносферы с изотопными характеристиками тихоокеанского MORB-типа. Эоценом следует датировать и начало раскрытия Японского моря, о чем свидетельствует образование в этот период небольших рифтов в Татарском проливе, заполненных эоценовыми прибрежно-морскими осадками. Миоценовый (основной) этап развития окраинно-морского бассейна связан со смещением зоны влияния океанической астеносферы к востоку, в область современных глубоководных котловин Японского моря.

Роль океанической астеносферы на развитие окраины континента закончилось в позднем миоцене после формирования Японского моря и образования новой зоны субдукции восточнее Японских островов.

Тектоника, микроэлементы, изотопы, мантийная геодинамика, Японское море, Восточный Сихотэ-Алинь.

MANTLE DIAPIRISM AT CONVERGENT BOUNDARIES (*Sea of Japan*)

Yu.A. Martynov, V.V. Golozubov, and A.I. Khanchuk

New data on geology, geochemistry, and isotope systematics of lavas in the East Sikhote-Alin area, along with earlier published evidence for the Sea of Japan, provide insights into the dynamics of back-arc basins and their role in the tectonic and magmatic history of continental margins. Right-lateral strike-slip faulting, the key event in the Cenozoic history of East Sikhote-Alin, apparently had no relation with the subduction in post-Eocene time. At that time, the Late Cretaceous subduction ended and oceanic asthenosphere with Pacific-type MORB isotope signatures injected into the subcontinental mantle through slab windows. The Sea of Japan opening began in the Eocene with formation of small rift basins in the Tatar Strait, which accumulated coastal facies. During the main Miocene phase of activity, the zone affected by oceanic asthenosphere moved eastward, i.e., to the modern deepwater Sea of Japan. The effect of oceanic asthenosphere on the continental margin ended in the Late Miocene after the Sea of Japan had opened and new subduction initiated east of the Japan Islands.

Tectonics, trace elements, isotopes, mantle geodynamics, Sea of Japan, East Sikhote-Alin

ВВЕДЕНИЕ

Западная Пацифика играет ключевую роль в определении динамики Земли, поскольку именно здесь сосредоточено большинство островных дуг и более чем 75 % окраинно-морских бассейнов. Субдукционные и задуговые процессы считаются связанными между собой, но причина и механизм этой связи остаются неясными. Согласно [Сондерс, Тарни, 1987], раскол окраины континента и формирование окраинных морей могут быть обусловлены тремя основными факторами:

- 1) пассивным диапиризмом, вызванным тектоническим растяжением литосферы;
- 2) активным диапиризмом под воздействием тепла и флюидов, генерирующихся в зоне Беньюффа;
- 3) динамической циркуляцией, охватывающей вторичные конвективные ячейки, возбуждаемые силами движения пластин при погружении в зоне Беньюффа [Karig, 1970; Martinez et al., 2007].

Последняя, наиболее популярная, модель предусматривает перемещение глубоководного желоба и части ранней вулканической дуги в сторону океана конвективными движениями в надсубдукционном мантийном клине, возбуждаемыми погружающейся океанической пластиной [Elsasser, 1971; Moberly, 1972]. В этом случае глубоководный желоб, вулканическую дугу и окраинное море можно рассматривать в качестве единой, взаимосвязанной субдукционной системы [Gill, 1981]. Такой подход позволяет объяснить устойчивые признаки геохимического деплетирования островодужных вулканитов в результате перемещений в зону их генерации участков мантии, испытавших плавление при формировании базальтовой коры окраинных морей [McCulloch, Gamble, 1991; Woodhead et al., 1993; Turner et al., 1997]. Но при этом остаются нерешенными ряд других вопросов субдукционного магмагенезиса, например, зарождение расплавов в зонах «холодной» субдукции, высокий ($> 2\text{—}3 \text{ ЕТП}^1$) тепловой поток [Watanabe et al., 1977] и аномально высокие температуры островодужных магм ($\sim 1350 \text{ }^\circ\text{C}$), низкие скорости сейсмических волн в надсубдукционной мантии [Tatsumi, 2003], наличие наклонных мантийных диапиров («горячих пальцев мантии»), регистрируемых под Японскими островами и протягивающихся от границ окраинного моря с глубины $> 150 \text{ км}$ под вулканический фронт [Tamura et al., 2002].

В данной статье некоторые из этих вопросов рассматриваются на примере Японского моря, структура, состав, строение осадочного чехла и коры которого изучены лучше, чем в любом другом окраинно-морском бассейне мира.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВРЕМЕНИ И ПРИЧИНАХ ФОРМИРОВАНИЯ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Идея о том, что впадина Японского моря образовалась в результате дрейфа на юго-восток отчленившегося фрагмента восточной окраины Азии, впервые высказана Т. Кобаяси и С.Н. Бубновым в 1941—1942 гг. [Кропоткин, Шахварстова, 1965]. В основе этой гипотезы лежало установленное А.Н. Криштофовичем и Т. Кобаяси [Кропоткин, Шахварстова, 1965] еще в 30-е годы прошлого столетия большое сходство мезозойской истории и мезозойской флоры Южного Приморья, Кореи и Внутренней Японии. Из этих черт сходства был сделан вывод о том, что в мезозое Япония располагалась гораздо ближе к материку, чем сейчас, а ее внутренняя зона вместе с Кореей и Южным Приморьем составляла единый континентальный массив, время от времени прогибавшийся и служивший ареной прибрежно-морского и континентального осадконакопления.

Полученные к настоящему времени геологические данные полностью подтверждают относительную общность мезозойской истории развития Сихотэ-Алиня и Японии. Большая часть территории Японии образована юрскими и нижнемеловыми аккреционными комплексами (пояса Мино, Тамба, Ашио, Чичибу, Симанто и др.), которые полностью аналогичны таковым в Сихотэ-Алине (Самаркинский и Таухинский террейны и их аналоги в Приамурье) и являются, очевидно, их прямыми продолжениями. Надсубдукционные поздне меловые вулканиты прослежены как вдоль побережья Сихотэ-Алиня и на отдельных подводных возвышенностях Японского моря, так и на о. Хонсю и юго-востоке Корейского полуострова [Мартьянов и др., 2006; Голозубов, 2006].

Весомым подтверждением тезиса о том, что Японские острова представляют собой фрагменты, отделившиеся от Евразии, послужили палеомагнитные данные, согласно которым раскрытие Японского моря сопровождалось вращением Юго-Западной Японии по часовой стрелке при одновременном вращении Северо-Восточной Японии против часовой [Kawai et al., 1962]. Составленная с учетом этих данных П.Н. Кропоткиным и К.А. Шахварстовой [1965] реконструкция положения блоков окраины Евразии до раскрытия Японского моря является, по-видимому, первой из многочисленных работ такого рода [Khanchuk, 2001; Голозубов, 2006].

Дальнейшие палеомагнитные исследования позволили датировать время главной фазы раскрытия Японского моря началом среднего миоцена ($\sim 15 \text{ млн лет}$) [Otofujii et al., 1985; Hirooka, 1988; Toshi, Namano, 1988; Nishitari, Tanone, 1988]. Эти данные хорошо согласуются с результатами глубоководного бурения (31-й рейс «Гломар Челленджер», 127-й и 128-й рейсы «Джоидес Резольюшен»), показавшие смену на этом возрастном уровне морской фауны, а также с результатами изотопных исследований базальтов СЗ Хонсю и ЮЗ Хоккайдо [Kurasawa, Konda, 1986; Nohda et al., 1988; Shuto et al., 1992]. В то же время им противоречат изотопные датировки, свидетельствующие о более древнем ($> 20 \text{ млн лет}$) возрасте новообразованной базальтовой коры [Yamano, 1985; Tamaki, 1986]. Биостратиграфические и радиометрические (К-Аг, Аг-Аг) данные по скважинам глубоководного бурения 797, 795, 794 показывают интервал 17—24 млн лет (ранний миоцен).

На основании обобщения большого объема геологической и геофизической информации, полученной в результате глубоководного бурения в рейсах 127 и 128, в работе [Tamaki et al., 1992] выделено 8 стадий формирования Японского моря:

¹ Единица теплового потока, равная 41.8 мВт/м^2 .

1. Сравнительно медленное начальное погружение территории — 32—23 млн лет.
2. Быстрое погружение дна на батимальную глубину, сопровождаемое спредингом, растяжением задуговой области и вращением Японской дуги — 23 и 19 млн лет.
3. Медленное погружение — 19—15 млн лет.
4. Вторая фаза быстрого погружения — 15.0—12.5 млн лет.
5. Возврат к медленному погружению — 12.5—10.0 млн лет.
6. Начало подъема дна и сопредельных территорий суши в результате смены режима растяжения на сжатие — 10—7 млн лет.
7. Ускорение поднятия и деформаций геологических структур вдоль границ окраинного моря — 5 млн лет.
8. Основной этап деформации и топографическая реорганизация большой площади Японского моря и окружающих территорий, сопровождаемые экстремально высокой скоростью подъема блоков земной коры (~ 500 м/млн лет) — 2—0 млн лет.

Быстрые погружения дна Японского моря в интервалах 23—19 и 15.0—12.5 млн лет свидетельствуют об их тектонической природе, что, по мнению [Jolivet, Tamaki, 1992], подтверждает сдвиговую модель, предложенную в статье [Lallemand, Jolivet, 1985].

Наряду с тектоникой в ряде работ [Берсенев и др., 1987; Deng et al., 1998; Maruyama et al., 2007; Емельянова, Леликов, 2013] важную роль в раскрытии Японского моря отводится глубинным мантийным плюмам. В пользу этой модели может свидетельствовать повышенная мощность коры под впадиной Ямато [Hirata et al., 1989], хотя ее новообразованной природе противоречат данные по тепловому потоку [Langseth, Tamaki, 1992], который лучше моделируется простым механизмом охлаждения океанической литосферы.

Важно отметить, что во всех более ранних исследованиях [Okamura et al., 2005] вопрос о прекращении субдукции при раскрытии задугового бассейна не рассматривался.

РАСКРЫТИЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ КАК ЭЛЕМЕНТ ОБЩЕЙ СТРУКТУРНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ В КАЙНОЗОЕ ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ АЗИАТСКОГО КОНТИНЕНТА

В настоящее время можно считать установленным, что формирование структур восточно-азиатской окраины в юрское и меловое время происходило на фоне активного динамического взаимодействия малоподвижной Евразии и прилегающей к ней с востока чрезвычайно мобильной океанической плиты Идзанаги (Кула). Последняя перемещалась с юга и юго-востока на север и северо-запад [Engelbreton et al., 1985], что для Сихотэ-Алиньского участка восточно-азиатской окраины, имеющего в целом восточное-северо-восточное (около 30°) простирание, выразилось в доминировании крупномасштабных левосдвиговых перемещений как вдоль границы континент—океан, так и вдоль прилегающих участков суши [Голозубов, 2006]. Для позднего мела, когда сжатие было ориентировано с юго-востока на северо-запад, реконструируется обстановка субдукционной окраины андийского типа, частью которой является Восточный Сихотэ-Алиньский надсубдукционный вулканоплутонический пояс [Геодинамика..., 2006; Голозубов, 2006]. Важно отметить, что в пределах расположенного севернее Восточно-Буреинского участка окраины, имевшего близкое к меридиональному простирание, левосдвиговые перемещения сохранялись в течение позднего мела [Голозубов, 2006] (рис. 1).

Совершенно иная ситуация реконструируется начиная с эоцена. Седиментация и вулканизм в этот период времени происходили на фоне и под влиянием значительных правосторонних сдвиговых перемещений вдоль систем разрывов меридионального простирания, в первую очередь, вдоль Хоккайдо-Сахалинской системы [Рождественский, 1969, 1997; Lallemand, Jolivet, 1985; Jolivet, Tamaki, 1992; Fournier et al., 1995; Геология..., 2004; Голозубов и др., 2012]. Эти перемещения происходили в поле сжатия, ориентированного в северо-восточном направлении (30—45°) и не совпадающего с ориентировкой давления, перемещавшейся по-прежнему на север и северо-запад Тихоокеанской океанической плиты [Engelbreton et al., 1985]. По мнению ряда исследователей, эти перемещения являются удаленным эффектом Индо-Евразийской коллизии [Jolivet et al., 1990; Worral et al., 1996; Flower et al., 1998].

Построенная на основе этих представлений модель раскрытия Японского моря [Lallemand, Jolivet, 1985] предполагает начало формирования зон рифтообразования на участке сопряжения двух несоосных правосдвиговых систем — Хоккайдо-Сахалинской и Цусимской в эоцене. С такими представлениями в некоторой мере согласуется открытие в пределах современной акватории Японского моря фрагментов развития более раннего, эоцен-олигоценного, седиментогенеза и вулканизма [Геология..., 2004]. Так, эоценовые терригенные образования (на начальных фазах континентальные, сменяющиеся прибрежно-морскими) установлены в северной части окраинно-морского бассейна вдоль побережья островов Хоккайдо и Сахалин, а олигоценные отложения распространены в Татарском проливе повсеместно [Геология..., 2004]. Эоценовые угленосные отложения известны также в некоторых впадинах,

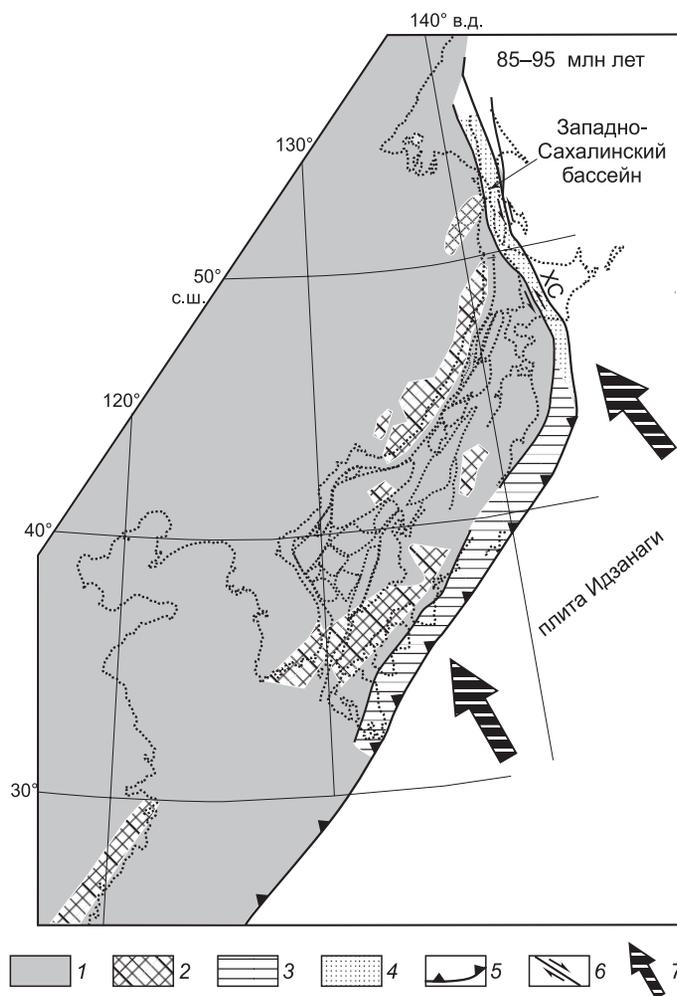


Рис. 1. Позднемеловые (сеноман-сантонские) структуры восточной окраины Азии.

1 — допозднемеловой континент; 2 — надсубдукционные вулканиды; 3 — аккреционные призмы; 4 — турбидитовые бассейны трансформных окраин; 5 — зоны субдукции; 6 — сдвиги трансформных окраин; 7 — направления перемещений плиты Идзанаги. ХС — Хоккайдо-Сахалинская система разломов.

окаймляющих Японское море, в частности, в Угловской на юго-западе Приморья [Голозубов и др., 2007]. Эоценовые и олигоценовые континентальные и прибрежно-морские отложения и вулканиды прослежены также вдоль восточной окраины Японского моря, в том числе на полуостровах Ога и Ното (о. Хонсю), о. Садо и севере о. Кюсю [Kano et al., 2007]. О седиментации в это время в южной части Японского моря свидетельствуют обнаруженные в терригенных породах раннего миоцена о. Цусима остатки перемытых эоценовых фораминифер [Sakai, Nishi, 1990] и радиолярий [Nakajo, Funakawa, 1996].

В миоцене, согласно [Lallemant, Jolivet, 1985], важнейшую роль в формировании котловины Ямато и других депрессий северо-восточного простирания, включая Корейское плато и грабены вдоль восточной периферии Японского моря, начинает играть задуговый спрединг, ось которого была перпендикулярна к простиранию Японских

островов. Таким образом, в данной модели формирование окраинного моря происходило по комбинированной схеме — тектонического рифтогенеза на ранней стадии и задугового спрединга на конечной.

В связи с вышеперечисленными данными следует предполагать, что начало раскрытия первых, возможно небольших, морских впадин следует датировать ~ 55 млн лет. Эти первые фазы рифтогенеза не сопровождались вращениями отделившихся от материка блоков (рис. 2, а), а седиментация и вулканизм происходили в локальных присдвиговых рифтах. В олигоцене и раннем миоцене область рифтообразования значительно расширилась, а на границе нижнего и среднего миоцена (около 15 млн лет) имел место ротационный раздвиг уже в рамках модели, предложенной И. Отофуджи [Otofujii, 1996] (см. рис. 2, б). Именно в этот период времени Японское море приобрело конфигурацию, близкую к современной. Некоторым подтверждением сказанному являются данные о третичных флорах Японии и Приморья — они полностью идентичны в эоцене—раннем миоцене и резко различны начиная со среднего миоцена, когда отделившаяся Япония начала омываться теплым течением Цусима [Павлюткин, Голозубов, 2010].

Еще раз подчеркнем, что, по нашему мнению, рифтогенез и вулканизм на окраине Евразии в интервале 55.0—1.8 млн лет происходили вне видимой связи с субдукцией, скорее всего, в период ее полного прекращения.

Очередная смена тектонического режима фиксируется в начале четвертичного времени ~1.8 млн лет. В это время, согласно [Jolivet, Tamaki, 1992], в северной части моря растяжение сменилось сжатием, реализация которого наиболее отчетливо проявлена вдоль восточного побережья. Здесь третичные отложения (вплоть до плиоценовых) смяты в крутые складки и широко проявлены надвиговые дислокации [Голозубов и др., 2012]. Этот этап деформаций, вероятно, фиксирует начало нового этапа субдукции, происходившей в поле близширотного (60—90°) сжатия, при котором доминировавшие до этого вдоль Хоккайдо-Сахалинской системы разломов правосдвиговые перемещения трансформировались в надвиговые. Подобное поле сжатия продолжается и в настоящее время, о чем свидетельствуют как сейсмические данные, так и результаты GPS-наблюдений [Василенко и др., 2009; Ким и др., 2009].

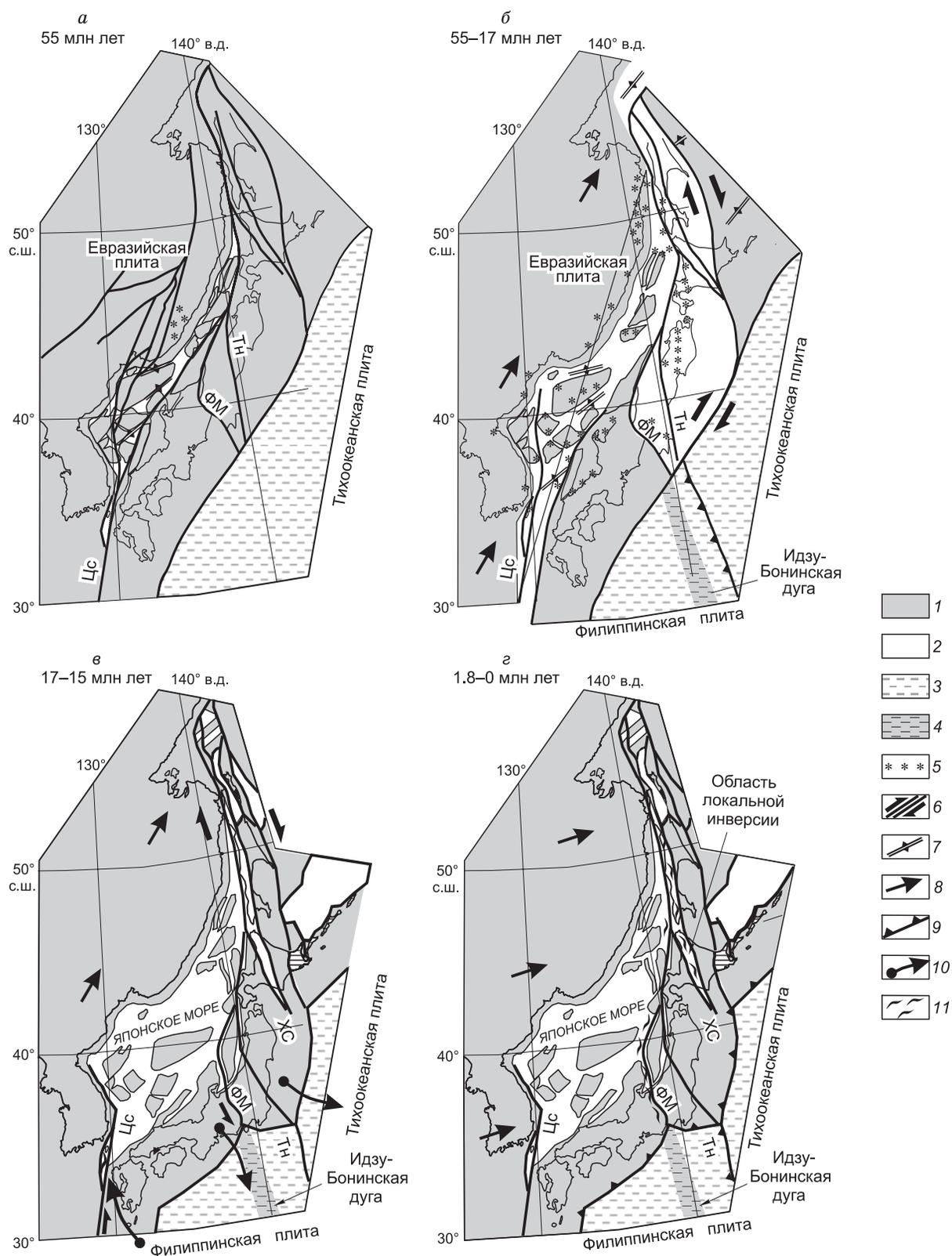


Рис. 2. Динамика раскрытия Японского моря (пояснения см. в тексте).

1 — докайнозойские террейны; 2 — участки новообразованной океанической коры; 3 — Тихоокеанская плита; 4 — осевая часть Идзу-Бонинской дуги; 5 — проявления вулканизма; 6 — сдвиговые зоны, в том числе ХС — Хоккайдо-Сахалинская, Тн — Та-накура, ФМ — Фосса-Магна, Цс — Цусимская; 7 — оси растяжения; 8 — направления перемещения плит; 9 — зоны субдукции; 10 — направления вращений блоков; 11 — области локальной инверсии.

КОРРЕЛЯЦИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ВОСТОЧНОМ СИХОТЭ-АЛИНЕ, СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ ХОККАЙДО И ЯПОНСКОМ МОРЕ

Основные лавы, вскрытые в глубоководных впадинах Японского моря, представлены силлами и дайками, внедрившимися в мягкий быстронакопившийся осадок, образовавшийся при быстром погружении дна окраинного бассейна [Tadaki et al., 1992]. Важной особенностью магматических пород является гетерогенный изотопно-геохимический состав, что свидетельствует о вовлечении в плавление нескольких мантийных источников. Природа этой гетерогенности осталась невыясненной. В работах [Pouclet, Bellon, 1992; Nohda et al., 1992] предполагался определенный возрастной разрыв между генерацией сравнительно деплетированных и обогащенных базальтов скв. 794 и 797. А. Поуклет и Х. Белон [Pouclet, Bellon, 1992] сделали вывод о происхождении верхних базальтов скв. 794 в результате плавления обогащенного мантийного резервуара OIB-типа (континентальные толеиты, ассоциирующие с ранней рифтовой стадией), тогда как более поздние выплавлялись из деплетированного источника MORB-типа при подъеме мантийного диапира в результате растяжения морского дна. В работе [Nohda et al., 1992] допускалось, что нижние обогащенные базальты скв. 797 и весь разрез скв. 794 являются разновозрастными, а деплетированные базальты скв. 797 образовались несколько позже. Основываясь на геохимических и Sr-Nd изотопных данных, большинство исследователей предполагало замещение обогащенной субконтинентальной верхней мантии деплетированной астеносферой при инъекции последней в раскрывающийся задуговой бассейн. Авторы публикации [Counsens, Allan, 1992] на основании Sr, Nd и Rb изотопии предложили иную модель происхождения основных лав впадины Ямато. Отмечая отчетливо выраженное смещение в свинцовых изотопах, они допустили, что все базальты образовались из деплетированной мантии, в различной степени обогащенной осадочным субдукционным компонентом. В этом случае, по мнению исследователей, нет необходимости предполагать крупномасштабное изменение глубинного субстрата при задуговом рифтогенезе.

Следует подчеркнуть, что данные, полученные в результате глубоководного бурения, охватывают сравнительно короткий возрастной интервал магматизма ~24—17 млн лет. Чтобы понять его место в истории развития восточной окраины Евразии, необходимы данные по сопредельным территориям, прежде всего, по Восточному Сихотэ-Алиню, естественной западной границе Японского моря. Новая геолого-петрологическая информация, полученная в последние годы по данной территории, а также по Курило-Камчатской островной дуге, является в этом отношении особенно значимой.

Восточный Сихотэ-Алиньский вулканогенный пояс (ВСАВП), длительность формирования которого составляет ~90 млн лет, протягивается вдоль побережья Японского моря и Татарского пролива на расстояние ~1500 км. В его развитии отчетливо выделяются три основных магматических этапа: позднемиоценовый (~90—70 млн лет), маастрихт-раннемиоценовый (~69.4—19.0 млн лет) и позднемиоцен-плиоценовый (~16—4 млн лет). Первые два возрастных интервала традиционно связывались с субдукцией океанической плиты Идзанаги (Кула), а после поглощения последней в глубоководном желобе (~100—90 млн лет) — Тихоокеанской плиты [Зоненшайн и др., 1990]. Наиболее молодые позднемиоцен-плиоценовые (~16—4 млн лет) платобазальты, образующие относительно небольшие по площади ареалы на востоке и западе Сихотэ-Алиня, всегда относились к внутриплитному типу. Такие представления не противоречили миоценовой (~15 млн лет) модели раскрытия Японского моря, но не согласуются с новыми геологическими и изотопно-геохимическими данными. В пределах ВСАВП надсубдукционными являются только позднемиоценовые средние и кислые по составу вулканы [Мартынов, Ханчук, 2013]. Кайнозойские эффузивы, представляющие наибольший интерес для данного исследования, формировались после прекращения активной субдукции в режиме рифтогенеза [Мартынов, 1999], разрушения субдукционной пластины и мантийного диапиризма [Ханчук и др., 1997; Мартынов и др., 2006; Мартынов, Ханчук, 2013].

О смене геодинамического режима в раннем кайнозое свидетельствует резкое изменение состава и характера локализации вулканогенных образований. Начиная с маастрихт-датского времени (69.40—60.45 млн лет) среди продуктов вулканической активности начинают преобладать средние и основные эффузивы, локализованные в рифтогенных структурах, развитые как в пределах полей позднемиоценовых надсубдукционных вулканитов, так и на значительном удалении от них, например, в западной части Приморья [Симаненко и др., 2002, 2006]. Важнейшей петрологической особенностью этих пород является гибридный состав минеральных ассоциаций [Мартынов и др., 2007]. Присутствие ультражелезистых силикатов: феррогеденбергита ($\text{Ca}_{44}\text{Mg}_2\text{Fe}_{54}$), феррогиперстена ($\text{Ca}_3\text{Mg}_{27}\text{Fe}_{70}$), фаялита (Fa_{89-99}), высокожелезистой роговой обманки (Hb_{70-80}) и биотита (Bi_{70-88}), «шариков» самородного железа и когенита косвенно свидетельствует о резко восстановительных условиях кристаллизации, не типичных для надсубдукционных образований [Grebenninkov, 1998].

Две последующие стадии кайнозойской вулканической активности — эоцен-олигоцен-раннемиоценовая и позднемиоцен-плиоценовая — связаны с излиянием преимущественно базальтов и соответствуют двум основным этапам кайнозойского внутриплитного вулканизма Северо-Восточного Китая и

Монголии [Deng et al., 1998], возрастным эпохам раскрытия окраинных морей Западной Пацифики [Flower et al., 1998].

Наиболее ранние вспышки эоцен-олигоцен-раннемиоценовой вулканической деятельности фиксируются на юге территории, в районе г. Находка (54.8 млн лет). В дальнейшем магматическая активность смещалась в центральную и северную части вулканогена. В основании разреза наряду с базальтами картируются риолитовые эффузивы, высокая объемная доля которых позволяет выделять бимодальную базальт-риолитовую ассоциацию [Мартынов, 1983; Попов, 1986], считающуюся индикатором начальных этапов континентального рифтогенеза.

Залегающая выше мощная пачка базальтов, андезибазальтов, редко андезитов сформировалась в результате деятельности щитовых вулканов и трещинных излияний. Последние были сосредоточены в вулканических грабенах субширотного или северо-западного простирания, поперечных к ориентации позднемиоценового вулканического пояса [Мартынов, 1999]. Важной геохимической особенностью базальтов, распространенных в грабенах, является повышенная титанистость ($TiO_2 > 1.3$ мас. %), что сближает их с внутриплитными вулканитами [Мартынов, 1999].

Максимальная интенсивность эоцен-олигоцен-раннемиоценового базальтового магматизма в Восточном Сихотэ-Алине соответствует возрастному интервалу ~35—37 млн лет [Мартынов, 1999], близкому, по представлениям [Tamaki et al., 1992], к начальному, амагматичному этапу формирования Японского моря (~32 млн лет). В то же время базальты с возрастом 24—17 млн лет, преобладающие в окраинно-морском бассейне, пользуются ограниченным развитием на окраине континента и описаны только на побережье вблизи г. Советская Гавань [Мартынов, 1999; Мартынов, Ханчук, 2013]. Подобная обратная корреляция интенсивности тектонических и магматических событий в морских бассейнах и сопредельных участках суши типична для всей Западной Пацифики [Cambrey et al., 1993].

Пространственно совмещенные в Восточном Сихотэ-Алине надсубдукционные позднемиоценовые и постсубдукционные кайнозойские вулканиты разобщены в юго-западной континентальной части Приморья, что подчеркивает их различную геодинамическую природу. На юго-западе кайнозойская вулка-

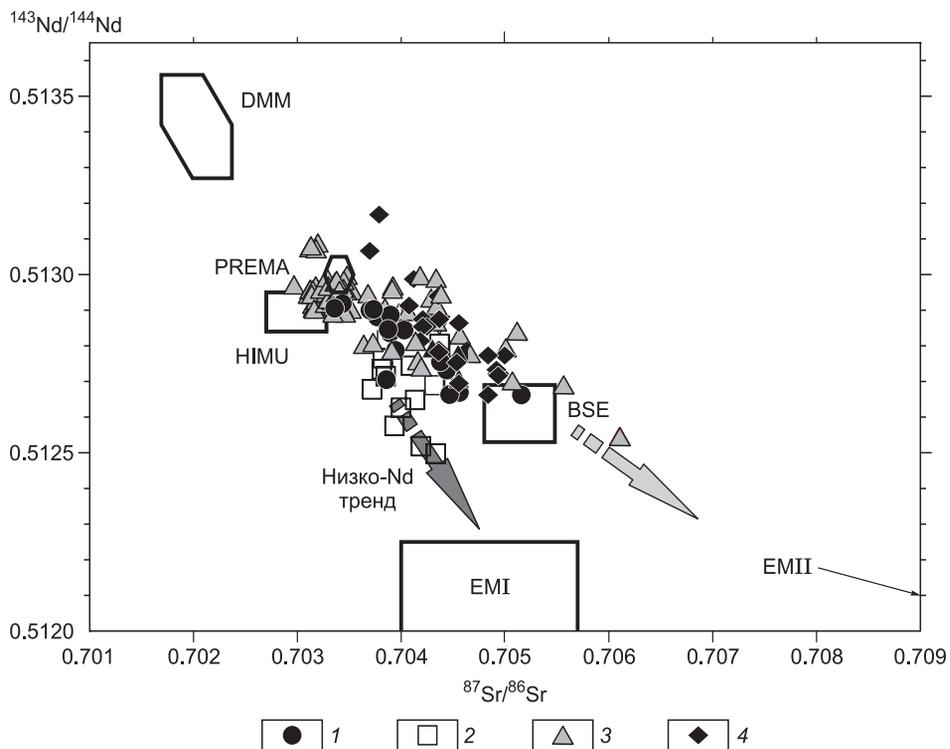


Рис. 3. Вариации изотопов Sr и Nd в разновозрастных вулканитах Японского моря и прилегающих участков суши.

1, 2 — Восточный Сихотэ-Алинь: эоцен—олигоцен—ранний миоцен (1), поздний миоцен—плиоцен (2); 3 — СВ Япония, миоцен; 4 — котловины Японского моря, средний миоцен. Изотопные компоненты, по [Zindler, Hart, 1986]: PREMA — основной мантийный резервуар; HIMU — мантия, обогащенная $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ и деплетированная $^{87}Sr/^{86}Sr$; BSE — валовой состав силикатной земли; DMM — деплетированная мантия, EMI и EMII — обогащенные мантийные компоненты первого и второго типов. Стрелками на диаграмме показаны тренды смещения изотопных компонентов: DMM—EMII и DMM—EMI. Источник данных — [Cousens, Allan, 1992; Nohda et al., 1992; Pouclet et al., 1995; Shuto et al., 2004; Okamura et al., 2005; Sato et al., 2013].

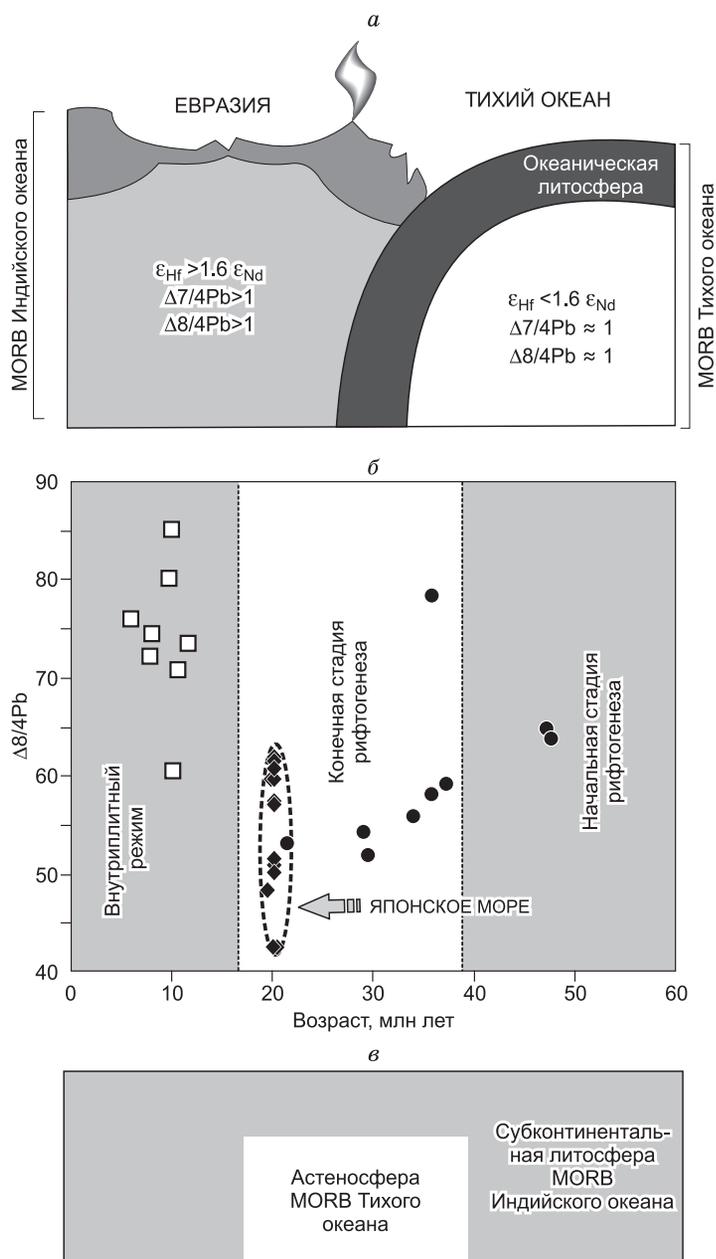


Рис. 4. Возрастные вариации $\Delta 8/4Pb$ в базальтах Восточного Сихотэ-Алиня, Японского моря и их интерпретация, по [Мартынов, Ханчук, 2013] с дополнениями.

а — локализация изотопных доменов индийского и тихоокеанского MORB-типов в Северо-Западной Пацифике; *б* — вариации величины $\Delta 8/4Pb$ в базальтах Восточного Сихотэ-Алиня в зависимости от возраста: начальная стадия рифтогенеза, внутриплитный режим; *в* — графическая интерпретация изотопно-геохимических данных. Усл. обозн. см. на рис. 3. Источник данных — [Cousens, Allan, 1992; Pouclet et al., 1995; Okamura et al., 2005].

ническая активность приурочена к синдвиговым рифтогенным осадочным бассейнам (Краскинский, Пойменский, Синеутесовский, Нарвинский и др.). Здесь основные лавы залегают непосредственно на пестроцветных угленосных вулканогенных осадках, сохраняя при этом те же, что и в Восточном Сихотэ-Алине, особенности строения разреза и состава, включая присутствие в основании бимодальной вулканической ассоциации [Мартынов и др., 2001]. Важной индикаторной особенностью вулканизма Юго-Западного Приморья является присутствие адакитов с низкими содержаниями HREE, Y (4.22—8.40) и высокими значениями Sr/Y (75.70—154) и $(La/Yb)_n$ (44.4—89.4) отношений [Чашин и др., 2014], что косвенно подтверждает вовлечение в плавление эклогитизированных базальтов верхнего слоя океанической коры.

Позднемиоцен-плиоценовая (14—3 млн лет) эпоха базальтового вулканизма Сихотэ-Алиня соответствует поздне-

третичной (миоцен, 20—5 млн лет) эпохе магматической активности в Северо-Восточном Китае и Монголии [Zhou, Armstrong, 1982]. Излияния основных лав носили преимущественно трещинный характер и происходили в тесной ассоциации с депрессиями, выполненными миоценовыми осадками.

Корреляция изотопно-геохимических характеристик продуктов кайнозойского вулканизма Восточного Сихотэ-Алиня и Японского моря дает возможность расшифровать мантийную геодинамику более детально, чем это сделано ранее [Okamura et al., 2005].

Возрастные вариации межэлементных и изотопных (Sr, Nd и Pb) отношений в эоцен-олигоцен-раннемиоценовых базальтах Восточного Сихотэ-Алиня и в раннемиоценовых лавах и силлах глубоководных котловин Японского моря описываются смещением деплетированного (DMM) и обогащенного (EMП) магматических источников (рис. 3). Последний связывают либо с субдукционным осадком [Cousens, Allan, 1992], либо с субконтинентальной литосферой [Flower et al., 1998]. Последний вариант кажется более логичным для внутриплитных базальтов Восточной Евразии, расположенных на значительном расстоянии от зон современной субдукции [Flower et al., 1998]. Вопросы локализации DMM мантийного компонента в пределах Восточной Евразии, как правило, не рассматриваются. Для Восточного Сихотэ-Алиня эта проблема может быть решена на основании свинцовых изотопных данных (рис. 4). Временному интервалу максимальной вулканической активности (~37—35 млн лет) соответствуют излияния базальтов с аномально высокими $^{143}Nd/^{144}Nd$ и аномально низкими $\Delta 8/4Pb$. Принимая

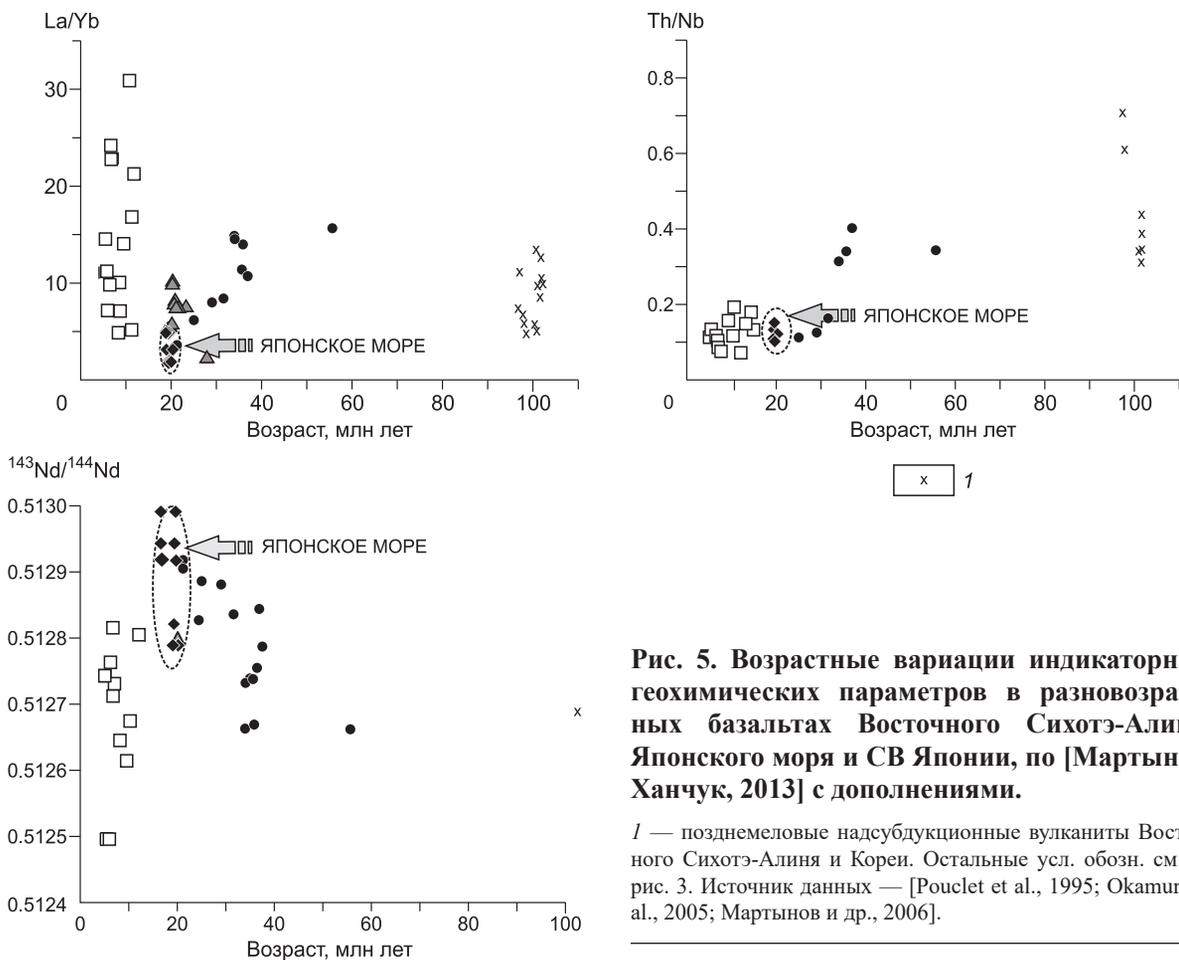


Рис. 5. Возрастные вариации индикаторных геохимических параметров в разновозрастных базальтах Восточного Сихотэ-Алиня, Японского моря и СВ Японии, по [Мартынов, Ханчук, 2013] с дополнениями.

1 — позднемеловые надсубдукционные вулканы Восточного Сихотэ-Алиня и Кореи. Остальные усл. обозн. см. на рис. 3. Источник данных — [Poucllet et al., 1995; Okamura et al., 2005; Мартынов и др., 2006].

во внимание конфигурацию границ мантийных доменов индийского и тихоокеанского MORB-типов в Северо-Западной Пацифике [Мартынов и др., 2012], это дает основание локализовать DMM компонент в деплетированной астеносфере Тихого океана.

Динамика взаимодействия океанической астеносферы и субконтинентальной мантии становится понятной при рассмотрении эволюции изотопно-геохимических характеристик кайнозойских вулканитов (рис. 4, 5). В Восточном Сихотэ-Алине с омоложением возраста излияний базальтов в интервале 55—19 млн лет закономерно уменьшаются величины La/Yb и Th/Yb отношений, но возрастает содержание радиогенного Nd, что свидетельствует о возрастании роли в магмогенезисе деплетированного источника. С учетом данных по свинцовым изотопам (см. рис. 4) это можно трактовать как результат внедрения в субконтинентальную литосферу с EMI изотопными характеристиками деплетированной астеносферы тихоокеанского MORB-типа. Последнее возможно только после разрушения древней субдукционной пластины и формирования астеносферных окон [Ханчук, Мартынов, 2011; Мартынов, Ханчук, 2013].

Изменение изотопно-геохимических характеристик миоценовых базальтов Японского моря и СВ Хоккайдо показывает сходную закономерность, хотя из-за сравнительно небольшого временного отрезка базальтовых излияний (~25—15 млн лет) и недостаточного количества данных по свинцовым изотопам она не столь отчетливо выражена. Величина $\Delta 8/4\text{Pb}$ в базальтах глубоководных котловин существенно варьирует [Tamaiki et al., 1992], не превышая при этом значений, наблюдаемых в эоцен-олигоцен-раннемиоценовых вулканитах Восточного Сихотэ-Алиня.

Вулканизм, аналогичный позднемиоцен-плиоценовому внутриплитному во впадинах Японского моря, а также в СВ Японии, не проявлен. В пределах Восточного Сихотэ-Алиня для него типична отчетливая корреляция геологических и изотопно-геохимических характеристик с размерами и особенностями локализации позднекайнозойских вулканических полей [Мартынов, 1999]. Крупные вулканические плато располагаются вдоль побережья Японского моря, где с ними тесно ассоциируют температурные аномалии в морском бассейне [Веселов и др., 1992] и проявления термальных источников с температурами до 54 °C в береговой полосе [Кирюхин, Резников, 1962]. Все это в совокупности предполагает важную роль в познекайнозойском внутриплитном магмогенезисе процессов, ранее протекавших в

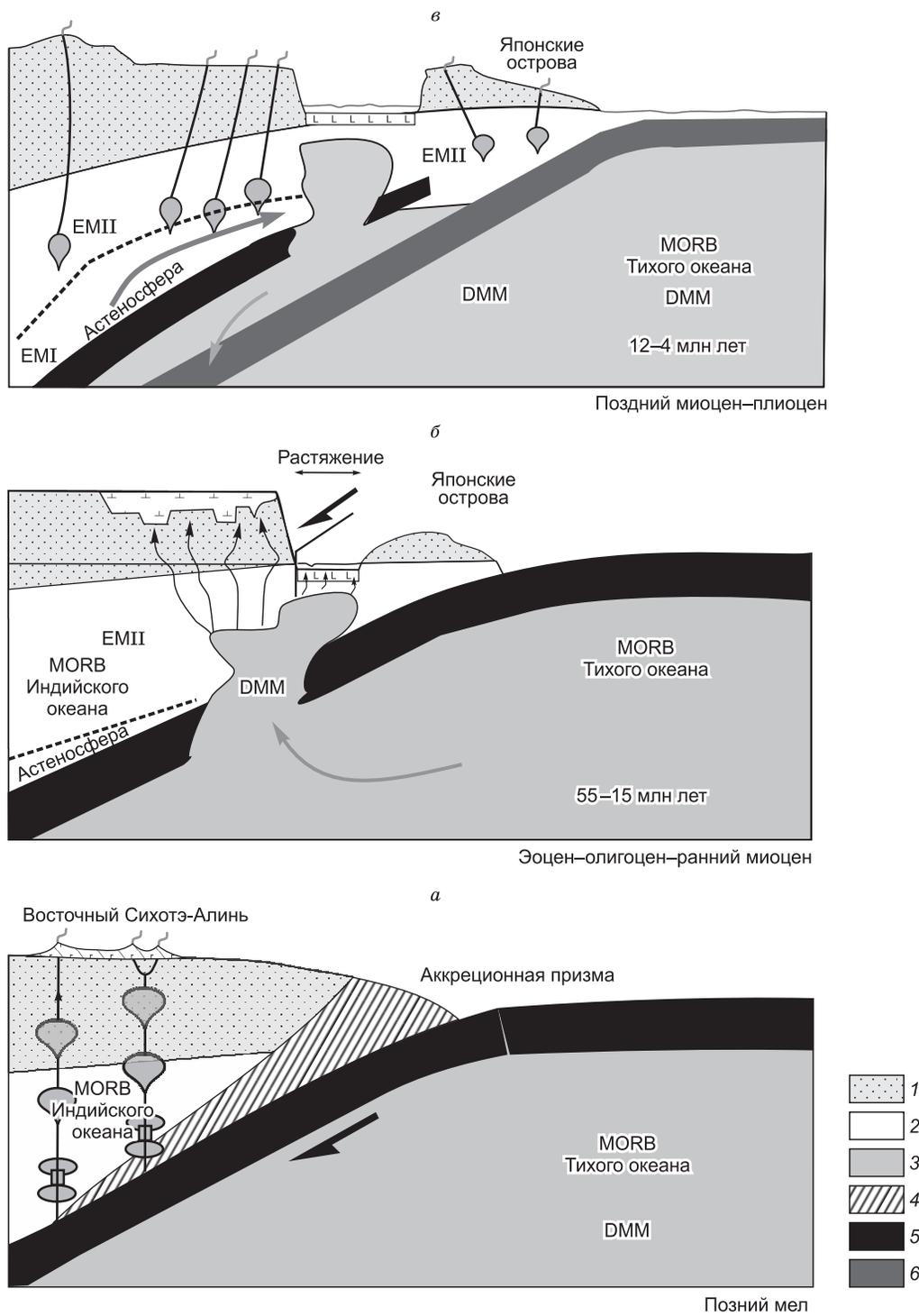


Рис. 6. Модель развития Восточного Сихотэ-Алиня, по [Мартынов, Ханчук, 2013] с добавлениями.

a — позднемоловая субдукция; *б* — разрыв позднемоловы субдукционной пластины сдвиговыми нарушениями и формирование астеносферных окон; *в* — формирование новой зоны субдукции под Японскую дугу; внутриплитный вулканизм на континентальной окраине. 1 — континентальная кора; 2 — континентальная литосфера и астеносфера; 3 — астеносфера Тихого океана; 4 — аккреционная призма; 5 — позднемоловая субдукционная пластина; 6 — современная субдукционная пластина. Изотопные компоненты см. на рис. 3.

окраинно-морском бассейне [Мартынов, 1999; Мартынов, Ханчук, 2013]. Аналогичные закономерности установлены в СВ Китае [Fan, Hooper, 1991] и на юге Кореи [Lee et al., 1994; Park, Kwon, 1993].

В отличие от более древних вулканогенных образований как Восточного Сихотэ-Алиня, так и Японского моря, позднемиоцен-плиоценовые внутриплитные базальты, особенно их низкокальциевые

разновидности, на диаграмме $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ формируют низко-Nd тренд (см. рис. 3), что предполагает участие в магмогенезисе ЕМ1 мантийного компонента. Астеносферная или глубинно-мантийная (плюмовая) природа ЕМ1 мантии в Восточной Евразии и Западной Пацифике до сих пор дискутируется [Storey et al., 1989; Tatsumoto, Nakamura, 1991; Mahoney et al., 1992; Flower et al., 1998; Zou et al., 2000; Kuritani et al., 2013; Ярмолук и др., 2013; Мартынов, Ханчук, 2013]. Но в любом случае мы должны предполагать смену направления движения мантийного вещества в позднем миоцене с восточного тихоокеанского на западное азиатское.

В работе [Ярмолук и др., 2013] важная роль в формировании конвергентной границы западно-тихоокеанского типа отводится Азиатскому суперплюму. С учетом наших данных, их влияние должно было носить ограниченный характер — не ранее среднего миоцена.

Общая модель развития восточной окраины Евразии в кайнозой представлена на рис. 6. Очевидно, что глубинная геодинамика в зоне взаимодействия океанической и континентальной литосферных плит была значительно более сложная, чем это предполагалось ранее [Okamura et al., 2005].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование Японского моря закономерно связано с активизацией правосторонних сдвиговых перемещений вдоль окраинно-континентальных систем разломов, которые происходили в эоцене—миоцене вне видимой связи с субдукцией. Эти перемещения привели к прекращению позднемиоценовой субдукции, формированию слэб-виндоу и внедрению в субконтинентальную мантию океанической астеносферы, контаминированной субдукционными компонентами.

Начало этого процесса фиксируется в южной части Восточного Сихотэ-Алиня. Его индикаторами являются базальты с переходными геохимическими характеристиками, а также адакиты осадочных бассейнов Юго-Западного Приморья. Начало раскрытия Японского моря также следует датировать эоценом, о чем свидетельствуют эоценовые терригенные образования (на начальных фазах континентальные, сменяющиеся прибрежно-морскими), установленные в северной части окраинно-морского бассейна вдоль побережья островов Хоккайдо и Сахалин. В дальнейшем в результате продолжающейся тектонической деструкции континентальной окраины роль астеносферного вещества в магмогенезисе возрастала. В позднем миоцене основная магматическая активность сместилась к востоку в глубоководные котловины формирующегося Японского моря.

Влияние астеносферы Тихого океана на окраину континента закончилось в позднем миоцене, после раскрытия Японского моря и формирования новой зоны субдукции восточнее Японских островов.

Смена направлений мантийных потоков, вызванная блокирующим влиянием новообразованной субдукции, привела к вспышке позднемиоцен-плиоценового внутриплитного базальтового вулканизма на окраине континента. Если связывать ЕМ1 изотопную аномалию с Азиатским суперплюмом, то влияние последнего на магматизм континентальной окраины должно ограничиваться временным интервалом средний миоцен—плиоцен.

Работа выполнена при поддержке инициативных грантов РФФИ (13-05-1290, 13-05-00100), полевого гранта РФФИ (14-05-10000).

ЛИТЕРАТУРА

Берсенеv И.И., Леликов Е.П., Безверхний В.Л., Ващенко Н.Г., Съедин В.Г., Терехов Е.П., Цой И.Б. Геология дна Японского моря. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1987, 140 с.

Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Ким Ч.У., Такахаша Х. Косейсмические деформации земной поверхности на о. Сахалин в результате Невельского землетрясения 02.08.2007, $M_w = 6/2$ // Тихоокеанская геология, 2009, т. 28, № 5, с. 16—21.

Веселов О.В., Гордиенко В.В., Соинов В.В. Обобщение данных по тепловому потоку // Тектоносфера тихоокеанской окраины Азии. Владивосток, Дальнаука, 1992, с. 115—121.

Геодинамика, магматизм и металлогения востока России. Т. 1 / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток, Дальнаука, 2006, 229 с.

Геология, геодинамика и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Татарского пролива / Отв. ред. Г.Л. Кириллова. Владивосток, Дальнаука, 2004, 220 с.

Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток, Дальнаука, 2006, 239 с.

Голозубов В.В., Микловда С.В., Донг-У Ли, Павлюткин Б.И., Касаткин С.А. Динамика формирования кайнозойской Угловской впадины (Южное Приморье) // Тихоокеанская геология, 2007, т. 26, № 4, с. 22—33.

Голозубов В.В., Касаткин С.А., Гранник В.М., Нечаюк А.Е. Деформации позднемиоценовых и кайнозойских комплексов Западно-Сахалинского террейна // Геотектоника, 2012, № 5, с. 22—44.

- Емельянова Т.А., Леликов Е.П.** Вулканизм как индикатор глубинного механизма формирования Японского и Охотского морей // Тихоокеанская геология, 2013, т. 321, № 2, с. 63—72.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М.** Тектоника литосферных плит территории СССР. Т. 2. М., Недра, 1990, 327 с.
- Кирюхин В.А., Резников А.А.** Новые данные по химическому составу азотных терм юга Дальнего Востока // Вопросы специальной гидрогеологии Сибири и Дальнего Востока. Иркутск, Изд-во СО АН СССР, 1962, с. 71—83.
- Ким Ч.У., Михайлов В.И., Сен Р.С., Семенова Е.П.** Невельское землетрясение 02.08.2007: анализ инструментальных данных // Тихоокеанская геология, 2009, т. 28, № 5, с. 4—15.
- Кропоткин П.Н., Шахварстова К.А.** Геологическое строение Тихоокеанского подвижного пояса. М., Наука, 1965, 358 с.
- Мартынов Ю.А.** Петрология эоцен-миоценовой контрастной формации Нижнего Приамурья. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1983, 140 с.
- Мартынов Ю.А.** Геохимия базальтов активных континентальных окраин и зрелых островных дуг на примере Северо-Западной Пацифики. Владивосток, Дальнаука, 1999, 218 с.
- Мартынов Ю.А., Ханчук А.И.** Кайнозойский вулканизм Восточного Сихотэ-Алиня: результаты и перспективы петрологических исследований // Петрология, 2013, т. 21, № 1, с. 94—108.
- Мартынов Ю.А., Коваленко С.В., Рассказов С.В., Саранина Е.В.** Геохимия и вопросы металлогении кайнозойских постсубдукционных известково-щелочных вулканитов юго-запада Приморья // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток, Дальнаука, 2001, с. 5—20.
- Мартынов Ю.А., Ли Д.У., Голозубов В.В., Рассказов С.В.** Геохимия и особенности формирования позднемиоценовых-миоценовых базальтов юга Корейского полуострова // Геохимия, 2006, № 6, с. 597—609.
- Мартынов Ю.А., Чашин А.А., Симаненко В.П., Мартынов А.Ю.** Маастрихт-датская андезитовая серия Восточного Сихотэ-Алиня: минералогия, геохимия и вопросы петрогенезиса // Петрология, 2007, т. 15, № 3, с. 282—303.
- Мартынов Ю.А., Кимура Дж.И., Мартынов А.Ю., Рыбин А.В., Катакузи М.** Присутствие мантии индийского MORB типа под Курильской островной дугой: результаты изотопных исследований мафических лав о-ва Кунашир // Петрология, 2012, № 1, с. 102—110.
- Павлюткин Б.И., Голозубов В.В.** Палеоботанические свидетельства времени возникновения Японского моря // Вестн. КРАУНЦ. Науки о земле. 2010, № 2 (16), с. 20—26.
- Попов В.К.** Петрология палеоген-неогеновых вулканических комплексов Восточного Сихотэ-Алиня. Владивосток, ДВО АН СССР, 1986, 152 с.
- Рождественский В.С.** Сдвиги Восточно-Сахалинских гор // Докл. АН СССР, 1969, т. 187, № 1, с. 156—159.
- Рождественский В.С.** Роль сдвигов в формировании структуры Сахалина, месторождений углеводородов и рудоносных зон // Геология и геодинамика Сихотэ-Алиньской и Хоккайдо-Сахалинской складчатых областей. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 1997, с. 80—109.
- Сондерс А.Д., Тарни Дж.** Геохимические характеристики базальтового вулканизма в задуговых бассейнах // Геология окраинных бассейнов. М., Мир, 1987, с. 102—183.
- Симаненко В.П., Ханчук А.И., Голозубов В.В.** Первые данные по геохимии альб-сеноманского вулканизма Южного Приморья // Геохимия, 2002, № 1, с. 95—99.
- Симаненко В.П., Голозубов В.В., Сахно В.Г.** Геохимия вулканитов трансформных окраин (на примере Алчанского бассейна, Северо-Западное Приморье) // Геохимия, 2006, № 12, с. 1251—1265.
- Чашин А.А., Чекрыжов И.Ю., Йокояма К., Цуцуми Ю., Блохин М.Г.** Возраст и изотопно-геохимические характеристики адакитоподобных пород Западного Приморья // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит (материалы Всероссийского совещания с иностранным участием). Владивосток, ДВГИ ДВО РАН, 2014, с. 278—281.
- Ханчук А.И., Мартынов Ю.А.** Тектоника и магматизм границ скольжения океанических и континентальных литосферных плит // Геологические процессы в зонах субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит (материалы Всероссийской конференции с международным участием). Владивосток, Дальнаука, 2011, с. 45—49.
- Ханчук А.И., Голозубов В.В., Мартынов Ю.А., Симаненко В.П.** Раннемеловая и палеогеновая трансформные континентальные окраины (калифорнийский тип) Дальнего Востока России // Тектоника Азии. М., ГЕОС, 1997, с. 240—243.
- Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И., Воронцов А.А.** Конвергентные границы западно-тихоокеанского типа и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (12), с. 1831—1850.

- Cambray H., Cadet J.-P., Pouclet A.** Ash layers in deep sea sediments as tracers of volcanic activity: Japan and central America as case studies // *The Island Arc*, 1993, № 2, p. 72—86.
- Cousens B.I., Allan J.F.** A Pb, Sr, and Nd isotopic study of basaltic rocks from the Sea of Japan, Legs 127/128 // *Proceeding of the Ocean Drilling Program, scientific results*, 1992, v. 127/128, p. 805—819.
- Deng J., Zhao H., Luo Z., Guo Z., Mo X.** Mantle plumes and lithosphere motion in East Asia // *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia* / Eds. M.F. Flower, S.-L. Chung, C.-H. Lo, T.-Y. Lee. Washington D.C., Amer. Geoph. Union, 1998, Geodynamics ser., v. 27, p. 59—67.
- Elsasser W.M.** Sea-floor spreading as thermal convection // *J. Geophys. Res.*, 1971, v. 76, p. 1101—1112.
- Engebretson D., Cox A., Gordon R.G.** Relative motions between oceanic and continental plates in the northern Pacific basin // *Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.*, 1985, v. 206, p. 1—59.
- Fan Q., Hooper P.R.** The Cenozoic basaltic rocks of Eastern China: Petrology and chemical composition // *J. Petrol.*, 1991, v. 32, part 4, p. 765—810.
- Flower M., Tamaki K., Hoang N.** Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in East Asia and the Western Pacific // *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia* / Eds. M.F. Flower, S.-L. Chung, C.-H. Lo, T.-Y. Lee. Washington D.C., Amer. Geoph. Union, 1998, Geodynamics ser., v. 27, p. 67—89.
- Fournier M., Jolivet L., Huchon P., Sergeyev K., Oskorbin L.S.** Neogene strike-slip faulting in Sakhalin and the Japan Sea opening // *J. Geophys. Res.*, 1995, v. 99, № B2, p. 2701—2725.
- Gill J.B.** Orogenic andesites and plate tectonics. New York, Springer, 1981, 390 p.
- Grebennikov A.V.** The ignimbrites of Yakutinskaya volcanic depression, Primorye, Russia: Anatomy and textures of ore-bearing granitoids of Sikhote Alin (Primorye Region, Russia) and related mineralisation // *Intern. Field Conf., Vladivostok, Russia. Vladivostok, Dalnauka*, 1998, p. 25—31.
- Hirata N., Tokuyama H., Chung T.W.** An anomalously thick layering of the crust of the Yamato Basin, southeastern Sea of Japan: the final stage of back-arc spreading // *Tectonophysics*, 1989, v. 165, p. 303—314.
- Hirooka K.** Neogene paleoposition of the Japanese islands inferred from paleomagnetic studies // *Neogene biotic evolution and related events. Osaka, Mus. Nat. Hist., Spec. Pub.*, 1988, p. 3—16.
- Jolivet L., Tamaki K.** Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the Northeast Japan Arc // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results*, 1992, v. 127/128, p. 1311—1331.
- Jolivet L., Davy Ph., Cobbod P.** Right-lateral shear along the Northwest Pacific margin and the India-Eurasia collision // *Tectonics*, 1990, v. 9, № 6, p. 1409—1419.
- Kano K., Uto K., Ohguchi T.** Stratigraphic review of Eocene to Oligocene successions along the Eastern Japan Sea: Implication for early opening of the Japan Sea // *J. Asian Earth Sci.*, 2007, v. 30, p. 20—32.
- Karig D.E.** Ridges and basins of the Tonga-Kermadec island arc system // *J. Geophys. Res.*, 1970, v. 75, p. 239—254.
- Kawai N., Kume S., Ito H.** Study on the magnetization of the Japanese rocks // *J. Geomagn. Geoelec.*, 1962, № 13, p. 150—203.
- Khanchuk A.I.** Pre-Neogene tectonics of the Sea-of-Japan region: a view from the Russian side // *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, 2001, v. 55, p. 275—291.
- Kurasawa H., Konda T.** Strontium isotopic ratios of the Tertiary volcanic rocks of northeastern Honshu, Japan: implication for the spreading of the Japan Sea // *J. Geol. Soc. Japan*, 1986, v. 92, p. 205—217.
- Kuritani T., Kimura J.-I., Ohtani E., Miyamoto H., Furuyama K.** Transition zone origin of potassic basalts from Wudalianch volcano, northeast China // *Lithos*, 2013, v. 156—159, p. 1—12.
- Lallemand S., Jolivet L.** Japan Sea: a pull-apart basin // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1985, v. 76, p. 375—389.
- Langseth M.G., Tamaki K.** Geothermal measurements: thermal evolution of the Japan Sea basin and Rise Sites, Legs 127 and 128 // *Proceeding of the Ocean Drilling Program, scientific results*, 1992, v. 127/128, p. 1297—1310.
- Lee M.W., Won C.K., Lee D.Y.** Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in southern Cheju Island, Korea // *J. Geological Soc. Korea*, 1994, v. 30, p. 521—541.
- Mahoney J., LeRoex A.P., Peng Z., Fisher R.L., Natland J.H.** Southwestern limits of Indian Ocean ridge mantle and the origin of low-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb mid-ocean ridge basalt: isotope systematics of the central Southwest Indian Ridge 9170_500 E // *J. Geophys. Res.*, 1992, v. 97, № 19, p. 771—719.
- Martinez F., Okino K., Ohara Y., Reysenbach A.-L., Goffredi S.K.** Back-arc Basins // *Oceanography*, 2007, v. 20, № 1, p. 116—127.

- Maruyama S., Santosh M., Zho D.** Superplume, supercontinent, and postperovskite: mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core-mantle boundary // *Gondwana Res.*, 2007, v. 11, № 1—2, p. 7—37.
- McCulloch M.T., Gamble J.A.** Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, v. 102, p. 358—374.
- Moberly R.** Origin of lithosphere behind island arcs, with reference to the western Pacific // *Studies in Earth and space sciences: A memoir in honor of Harry Hammond Hess, Memoir 132* / Eds. R. Shagam, R.B. Hargrave, W.J. Morgan, F.B. Van Houten, C.A. Burk, H.D. Holland, L.C. Hollister. *Geol. Soc. Amer.*, Boulder, Colorado, 1972, p. 35—55.
- Nakajo T., Funakawa T.** Eocene radiolarians from the Lower Formation of the Taishu Group // *J. Geol. Soc. Japan*, 1996, v. 102, p. 751—754.
- Nishitani T., Tanone S.** Paleomagnetic study for the Oga Peninsula in northeast Japan // *Rep. Akita Univ., Mining Coll., Res Inst. Natur. Resour.*, 1988, № 53, p. 69—75.
- Nohda S., Tatsumi Y., Otofujii Y., Matsuda T., Ishizaka K.** Asthenospheric injection and back-arc opening: isotopic evidence from Northeast Japan // *Chem. Geol.*, 1988, v. 68, p. 317—327.
- Nohda S., Tatsumi Y., Yamashita S., Fujii T.** Nd and Sr isotopic study of Leg 127 basalts: implications for the evolution of the Japan Sea backarc basin // *Proceeding of the Ocean Drilling Program, scientific results*, 1992, v. 127/128, p. 899—904.
- Okamura S., Arculus R.J., Martynov Yu.A.** Cenozoic magmatism of the North-Eastern Eurasian margin: the role of lithosphere versus asthenosphere // *J. Petrol.*, 2005, v. 46, № 2, p. 221—253.
- Otofujii Y.** Large tectonic movement of the Japan Arc in Late Cenozoic times inferred from paleomagnetism: review and synthesis // *The Island Arc*, 1996, v. 5, p. 229—249.
- Otofujii Y., Matsuda T., Nohda S.** Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan Arc // *Nature*, 1985, v. 317, p. 603—604.
- Park J.B., Kwon S.T.** Geochemical evolution of the Cheju volcanic island (II): trace element chemistry of volcanic rocks from the northern part of Cheju island // *J. Geol. Soc. Korea*, 1993, v. 29, p. 477—492.
- Poucllet A., Bellon H.** Geochemistry and isotopic composition of volcanic rocks from the Yamato Basin: Hole 794D, Sea of Japan // *Proceeding of the Ocean Drilling Program, scientific results*, 1992, v. 127/128, p. 779—790.
- Poucllet A., Lee J., Vidal P., Cousens B., Bellon H.** Cretaceous to Cenozoic volcanism in South Korea and in the Sea of Japan: magmatic constrains on the opening of the back-arc basin // *Volcanism Associated with Extension at Consuming Plate Margin*, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1995, № 81, p. 169—191.
- Sakai H., Nishi H.** Geologic ages of the Taishu Group and the Katsumoto Formation in the Tsushima and Iki islands, off northwest Kyushu on the basis of planktonic foraminifers // *J. Geol. Soc. Japan*, 1990, v. 96, p. 389—392.
- Sato M., Shuto K., Uematsu M., Takahashi T., Ayabe M., Takahashi K., Ishimoto H., Kawabata H.** Origin of Late Oligocene to Middle Miocene adakitic andesites, high magnesian andesites and basalts from the back-arc margin of the NE Japan Arcs // *J. Petrol.*, 2013, v. 54, № 3, p. 481—524.
- Shuto K., Kagami H., Yamamoto K.** Temporal variation of Sr isotopic compositions of the Cretaceous to Tertiary volcanic rocks from Okushiri Island, Northeast Japan Sea // *J. Miner. Petrol. Econ. Geol.*, 1992, v. 87, p. 165—173.
- Shuto K., Hirahara Y., Ishimoto H., Aoki A., Jimbo A., Goto Y.** Sr and Nd isotopic compositions of the magma source beneath north Hokkaido, Japan: comparison with the back-arc side in the NE Japan arc // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2004, v. 134, p. 57—75.
- Storey M., Saunders A.D., Tarney J., Gibson I.L., Norry M.J., Thirlwall M.F., Leat P., Thompson R.N., Menzies M.A.** Contamination of Indian ocean asthenosphere by the Kerguelen-Heard plume // *Nature*, 1989, v. 338, p. 574—576.
- Tamaki K.** Age estimation of the Japan Sea on the basis of stratigraphy, basement depth, and heat flow data // *Geomagn. Geoelectr.*, 1986, v. 38, p. 427—446.
- Tamaki K., Suyehiro K., Allan J., Ingle J.C., Pisciotto K.A.** Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling // *Proceeding of the Ocean Drilling Program, scientific results*, 1992, v. 127/128, p. 1333—1348.
- Tamura Y., Tatsumi Y., Zhao D., Kido Y., Shukuno H.** Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 197, p. 105—116.
- Tatsumi Y.** Some constraints on arc magma genesis // *Inside the subduction factory*. *Amer. Geophys. Union*, 2003, p. 277—292.
- Tatsumoto M., Nakamura Y.** DUPAL anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, v. 55, p. 3697—3708.

Tosha T., Hamano Y. Paleomagnetism of Tertiary rocks from the Oga Peninsula and the rotation of north-east Japan // *Tectonics*, 1988, v. 7, № 3, p. 653—662.

Turner S., Hawkesworth C., Rogers N., Bartlett J., Worthington T., Hergt J., Pearce J.A., Smith I. ^{238}U — ^{230}Th disequilibria, magma petrogenesis, and flux rates beneath the depleted Tonga-Kermadec Island // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, v. 61, p. 4855—4884.

Zhou X., Armstrong R.L. Cenozoic volcanic rocks of eastern China — secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1982, v. 58, p. 301—329.

Zindler A., Hart S. Chemical geodynamics // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1986, v. 14, p. 493—571.

Zou H., Zindler A., Xu X., Qi Q. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance // *Chem. Geol.*, 2000, v. 171, p. 33—47.

Watanabe T., Langseth M.G., Anderson R.N. Heat flow in back-arc basins of the western Pacific // *Island arcs, deep sea trenches, and back-arc basins* / Eds. M. Talwani, I.W.C. Pitman. Amer. Geophys. Union, 1977, p. 137—167.

Woodhead J.D., Eggins S., Gamble J. High field strength and transition element systematics in island arc and back-arc basin basalts: Evidence for multi-phase melt extraction and a depleted mantle wedge // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, v. 114, p. 491—507.

Worrall D.M., Kruglyak V., Kunst F., Kuznetsov V. Tertiary tectonics of the Sea of Okhotsk, Russia: Far-field effects of the India-Eurasia collision // *Tectonics*, 1996, v. 15, № 4, p. 813—826.

Yamano M.L. Heat flow in the ocean basins and margins // *The ocean basins and margins* / Eds. A.E.M. Nairn, E.G. Stehli, S. Uyeda. New York, Plenum, 1985, v. 7B, p. 523—557.

*Поступила в редакцию
8 июля 2015 г.*