

УДК 550.4:551.2(571.6)

КАЙНОЗОЙСКИЙ ВУЛКАНИЗМ ВОСТОЧНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2013 г. Ю. А. Мартынов, А. И. Ханчук

Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН
просп. 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022, Россия; e-mail: martynov@fegi.ru; khanchuk@fegi.ru

Поступила в редакцию 12.02.2012 г.
Получена после доработки 12.04.2012 г.

Полученные в последнее десятилетие геологические и изотопно-геохимические данные, позволяют рассматривать Восточный Сихотэ-Алинский вулканический пояс как полигенную структуру с пространственно совмещенными магматическими образованиями различных геодинамических этапов развития. К типично субдукционным можно относить только позднемиоценовые средние и кислые по составу вулканы, обогащенные LILE и деплетированные HFSE. Формирование кайнозойских преимущественно основных лав происходило после завершения активной субдукции в сложном динамическом режиме перестройки Восточной Евразии в результате коллизии Индийской плиты. Излияния эоцен-олигоцен-раннемиоценовых высокоглиноземистых базальтов соответствовало этапу скольжения литосферных плит, разрыву древней субдукционной пластины и внедрению в субконтинентальную азиатскую литосферу с ЕМП изотопными характеристиками горячей и деплетированной океанической астеносферы Тихоокеанского MORB-типа.

Позднемиоцен-плиоценовая магматическая активность в Восточном Сихотэ-Алине носила внутриплитный характер, но состав излившихся магм во многом определялся предшествующими тектономагматическими событиями – разновозрастной субдукцией и раскрытием Япономорской котловины. Отчетливо выражена ЕМ изотопная специфика низкокальциевых платобазальтов, не регистрируемая в лавах более ранних этапов развития вулканогена, свидетельствует о вовлечении в магмогенез континентальной астеносферы, смене направлений мантийных потоков в результате формирования новой зоны субдукции.

DOI: 10.7868/S0869590313010068

ВВЕДЕНИЕ

Островодужные системы Северо-Западной Пацифики в составе глубоководного желоба, вулканической островной дуги и задугового морского бассейна ассоциируют с расположенными в тылу, на окраине континента древними и слабоизученными вулканическими поясами. Ранее их рассматривали как древние аналоги современного надсубдукционного Андийского пояса Южной Америки, но новые данные по Восточному Сихотэ-Алинскому вулканическому поясу свидетельствуют о том, что такие представления являются в значительной степени упрощенными. Взаимодействие океанических и континентальных плит в Северо-Западной Пацифике в позднем мезозое и кайнозое было более комплексным.

Восточный Сихотэ-Алинский вулканический пояс (ВСАВП) был выделен в 1957 году Н.С. Шатским. В дальнейшем его происхождение рассматривалось как результат субдукции под Евроазиатский континент плиты Кула (150–60 млн. лет), а после ее поглощения в глубоковод-

ном желобе – Тихоокеанской (Зоненшайн и др., 1990). Только наиболее молодые, позднемиоцен-плиоценовые платобазальты относились к постсубдукционному внутриплитному этапу. Такие представления не противоречат миоценовой модели раскрытия Японского моря (Otofuji et al., 1985; Hirooka, 1988; Tosha, Hamano, 1988; Nishitari, Tanone, 1988), хорошо обоснованной палеомагнитными данными (Isezaki, 1986; Kono, 1986), закономерностями изменения морской фауны, миоценовым возрастом базальтов Японской котловины (Tatsumoto, Nakamura, 1991), резким падением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения в базальтах Северо-Западного Хонсю и Юго-Западного Хоккайдо в интервале ~15 млн. лет (Kurasawa, Konda, 1986; Nohda et al., 1988; Shuto et al., 1992). Однако тектоническая перестройка Восточной Евразии, частью которой является и Восточный Сихотэ-Алинь, началась не в миоцене, а гораздо раньше, по крайней мере, в эоцене. “Жесткая” коллизия Индийской континентальной плиты вызвала массивные дислокации литосферы, ее локальное скупивание и растяже-

ние, латеральные перемещения отдельных блоков вдоль региональных сдвиговых систем разломов (Dewey et al., 1989; Tarronnier et al., 1986 и др.), раскрытие окраинных морей и периодические вспышки базальтового вулканизма. Влияние этого планетарного события прослеживается на огромной территории Восточной Евразии, в том числе и в Восточном Сихотэ-Алине. Формирование кайнозойских, преимущественно основных, вулкаников происходило здесь после завершения активной субдукции, в режиме рифтогенеза (Мартынов, 1999), разрушения субдукционной пластины и возникновения слэб-виндоу (Ханчук и др., 1997; Мартынов и др., 2006 и др.).

В настоящей статье эти вопросы рассматриваются более детально, с привлечением аналитических данных, полученных различными исследователями с помощью современных инструментальных методов.

ВОЗРАСТНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВУЛКАНОГЕННЫХ ТОЛЩ

Восточный Сихотэ-Алинский вулканический пояс в современном виде представляет собой непрерывную полосу вулканических и связанных с ними интрузивных пород позднемелового-плиоценового возраста, протягивающуюся вдоль побережья Японского моря и Татарского пролива на расстоянии около 1500 км, при ширине 20–90 км (рис. 1). Мощность земной коры варьирует от 25–30 км в северной части пояса и до 40 км в южной (Лишневский, 1969; Глубинное строение..., 1976). Фундаментом для вулканогенных образований служат терригенные породы Нижнеамурского (на севере) и Кемского (центральная и южная части) террейнов (Ханчук, 1993).

Поздний мел. Разрез позднемеловых вулкано-генных образований начинается с позднеэоценоманских андезитов, выходящих на поверхность, главным образом в западной части пояса, где они пространственно ассоциируют с комагматичными интрузиями габбро-диорит-гранитов.

Выше по разрезу картируется толща кислых лав и пирокластики, строение и состав извергнутых пород которой отчетливо коррелирует с составом фундамента. На севере, в пределах Нижнеамурского террейна, мощность дацитовой и риодацитовой пирокластики не превышала 500 м (Мартынов, 1999). На юге, в пределах Кемского террейна, вулканическая активность была более интенсивной, а в составе продуктов извержений преобладали риолиты.

Кайнозой. В маастрихт-датское время (69.4–60.45 млн. лет) в локальных депрессионных структурах, как в пределах позднемелового вулканического пояса, так и на значительном расстоя-

нии от него, в тыловой зоне, формировался преимущественно андезитовый по составу вулканический комплекс (Grebenninkov, 1998; Симаненко и др., 2006, 2011).

Две последующие стадии кайнозойской преимущественно базальтовой активности – эоцено-олигоцен-раннемиоценовая и позднемиоцен-плиоценовая, соответствует двум основным этапам кайнозойского вулканизма северо-восточного Китая и Монголии (Deng et al., 1998) и 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. Находки (54.8 млн. лет). В дальнейшем они смешались в центральную и северную части вулканогена, достигая максимума в интервале ~35–37 млн. лет (рис. 2). 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 типичны для вулканических грабенов субширотного или северо-западного простирания, поперечных к ориентации позднемелового вулканического пояса (Мартынов, 1999). Самые молодые эффузивы, с возрастными датировками в 19–24 млн. лет встречаются редко, главным образом по периферии крупного позднемиоцен-плиоценового Совгаванского плато.

Пространственно совмещенные в Восточном Сихотэ-Алине, позднемеловые кислые и эоцено-олигоцен-раннемиоценовые основные вулкани-ты, разобщены в юго-западной континентальной части Приморья. Здесь, основные лавы залегают непосредственно на пестроцветных угленосных вулканогенных осадках, сохраняя при этом те же, что и в Восточном Сихотэ-Алине, особенности строения разреза, включая присутствие в основании бимодальной вулканической ассоциации (Мартынов и др., 2001). Различные по площади и слабо изученные поля эоценовых базальтов картируются и в западной части Приморья и Хабаровского края.

Позднемиоцен-плиоценовая (14–3 млн. лет) эпоха базальтового вулканизма Восточного Сихотэ-Алиня соответствует поздне-третичному (миоцен, 20–5 млн. лет) этапу магматической активности Северо-Восточного Китая и Монголии (Zhou, Armstrong, 1982). Излияния основных лав носили преимущественно трещинный характер и происходили в тесной ассоциации с депрессиями, выполненными миоценовыми осадками

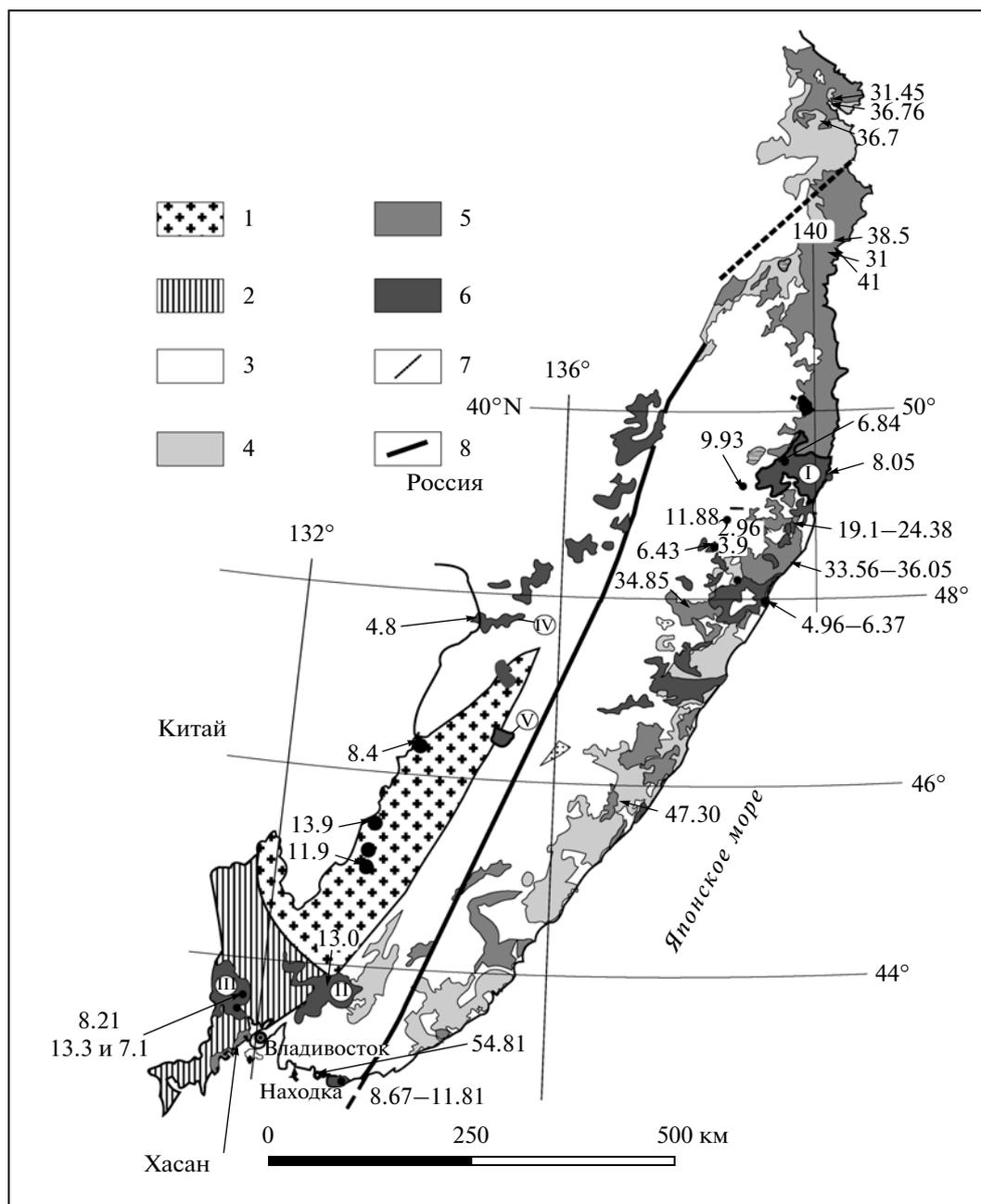


Рис. 1. Схематическая структурно-тектоническая карта юга Дальнего Востока России, по (Мартынов и др., 2002) с дополнениями.

1–3 – блоки континентальной литосферы, выделенные по геологическим данным: Ханкайский (1), Южно-Приморский (2), Сихотэ-Алинский (3); 4 – позднемеловые вулканы Восточного Сихотэ-Алинского вулканогена; 5, 6 – **чет-вертичные** базальтоиды: эоцен-олигоцен-раннемиоценовые высокоглиноземистые (5) и позднемиоцен-плиоценовые (6); 7 – условная граница Нижнеамурского (Киселевско-Маноминского) и Кемского террейнов, по (Голозубов, 2006); 8 – Центральнo-Сихотэ-Алинский разлом.

Римскими цифрами – поля позднекайнозойских платоэффузивов: Совгаванское (I), Шкотовское (II), Шуфанское (III), Острогорское (IV), Вострецовская группа вулканов (V).

Арабскими цифрами на диаграмме показаны значения абсолютного возраста, в млн. лет.

(Мартынов, 1999, Мартынов и др., 2002). Размеры вулканических полей и объемы излившихся лав отчетливо коррелируют с особенностями их локализации по отношению к побережью Японского

моря и Татарского пролива (рис. 1). Вблизи береговой линии сосредоточены наиболее крупные плато – Совгаванское, Нельминское, Бикинское, Шкотовское и Шуфанское, в разрезах которых

преобладают низко- и умеренно-калиевые вулканиды, незакономерно переслаивающиеся между собой в природных обнажениях (Есин и др., 1992) и кернах скважин (Мартынов, 1999). Причем объемная доля низкокалиевых базальтов в пределах конкретного вулканического поля также возрастает в восточном направлении (Мартынов, 1999; Мартынов и др., 2002). Щелочные базальтоиды слагают самостоятельные небольшие по размерам вулканические постройки преимущественно по периферии главных вулканических ареалов.

В западной зоне Приморья позднемиоцен-плиоценовые субщелочные и щелочные оливиновые базальты, пикриты и пикритбазальты формируют относительно небольшие лавовые фрагменты или моногенные вулканы (Чашин и др., 2007).

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МАГМАТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ВУЛКАНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Поздний мел. Позднемеловой этап магматизма Восточного Сихотэ-Алиня рассматривается как надсубдукционный (Ханчук, 2000). В это время в режиме активной континентальной окраины, формировался Восточно-Азиатский мегапояс, частью которого являлся и Восточный Сихотэ-Алинь. Особенности распределения некогерентных элементов в базальтах типичны для основных лав современных островодужных систем (рис. 3) с отчетливыми Sr, K, Rb, Ba, Th положительными аномалиями и Nb-Ta минимумом (Симоненко и др., 2002). Поперечная петрохимическая зональность — важная особенность надсубдукционных вулканидов, не выявлена, поскольку выходы на поверхность позднемеловых эффузивов наблюдаются только в западной, наиболее эродированной части территории. В то же время в позднемеловых интрузивных образованиях зональность прослеживается достаточно отчетливо. Массивы, расположенные в восточной части пояса (на побережье Японского моря), представлены крупными многофазными телами диорит-гранодиорит-гранитов магнетитовой серии. В западной, континентальной зоне преобладают однофазовые тела, сложенные гранитами ильменитового ряда. С востока на запад реконструируется углубление магматических очагов с 12–15 до 18–20 км. В этом же направлении возрастают первичные $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения пород (Валуй, 2004, 2011).

Аналогичные закономерности характерны и для южной части Корейского полуострова. Здесь нижние горизонты позднемелового разреза представлены лавами и агломератовыми туфами базальтов и андезибазальтов, перекрывающиеся андезитами, дацитами и риолитами (Geology of Korea, 1987). По основным геохимическим характеристикам основ-

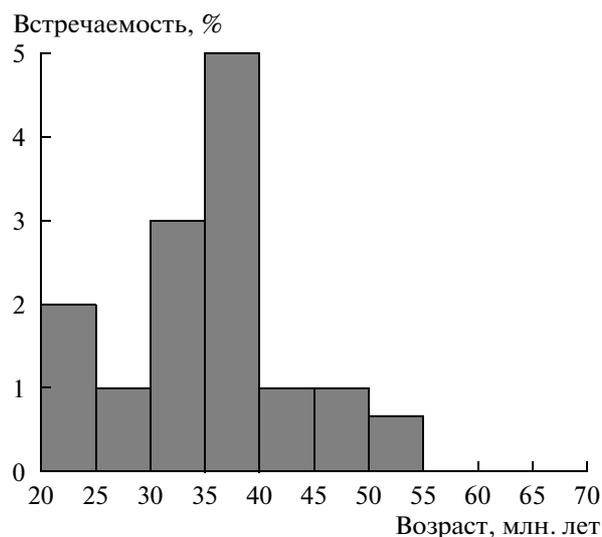


Рис. 2. Гистограмма частоты встречаемости К-Аг возрастных датировок (количество анализов) эоцен-олигоцен-раннемиоценовых базальтов и андезибазальтов в пределах Восточного Сихотэ-Алиня.

Литературный источник: (Мартынов, 1999; Мартынов и др., 2002), а также неопубликованные данные авторов.

ные лавы относятся к типичным надсубдукционным образованиям с повышенными концентрациями Al_2O_3 , и низкими — TiO_2 и HFSE (Мартынов и др., 2006).

Кайнозой. *Маастрихт-датские*, преимущественно андезитовые по составу вулканиды представляют собой гибридные образования, с отчетливыми признаками участия в магмогенезисе корового материала (Мартынов и др., 2007). В минералогическом отношении это выражается в обратной зональности крупных фенокристов плагиоклаза и присутствии ксеногенных кристаллов граната, с высоким содержаниемgrossулярного (70–71%) минала. Такой гранат типичен для некоторых типов скарнов и продуктов метаморфизма известковистых пород. Геохимическим индикатором коровой контаминации являются гиперболические зависимости отношений некогерентных элементов с близкими валовыми коэффициентами распределения, например K/Rb и Ba/Rb. К важным особенностям маастрихт-датских вулканидов следует отнести восстановительные условия кристаллизации (Grebenninkov, 1998), не типичные для субдукционных геодинамических обстановок.

Эоцен-олигоцен-раннемиоценовые базальтоиды характеризуются повышенными содержаниями оксида алюминия и низкими нормализованными концентрациями HFSE, что позволяет ряду исследователей рассматривать их как надсубдукционные (например, Брант и др., 2009; Рассказов и др., 2010). Но для магматических комплексов,

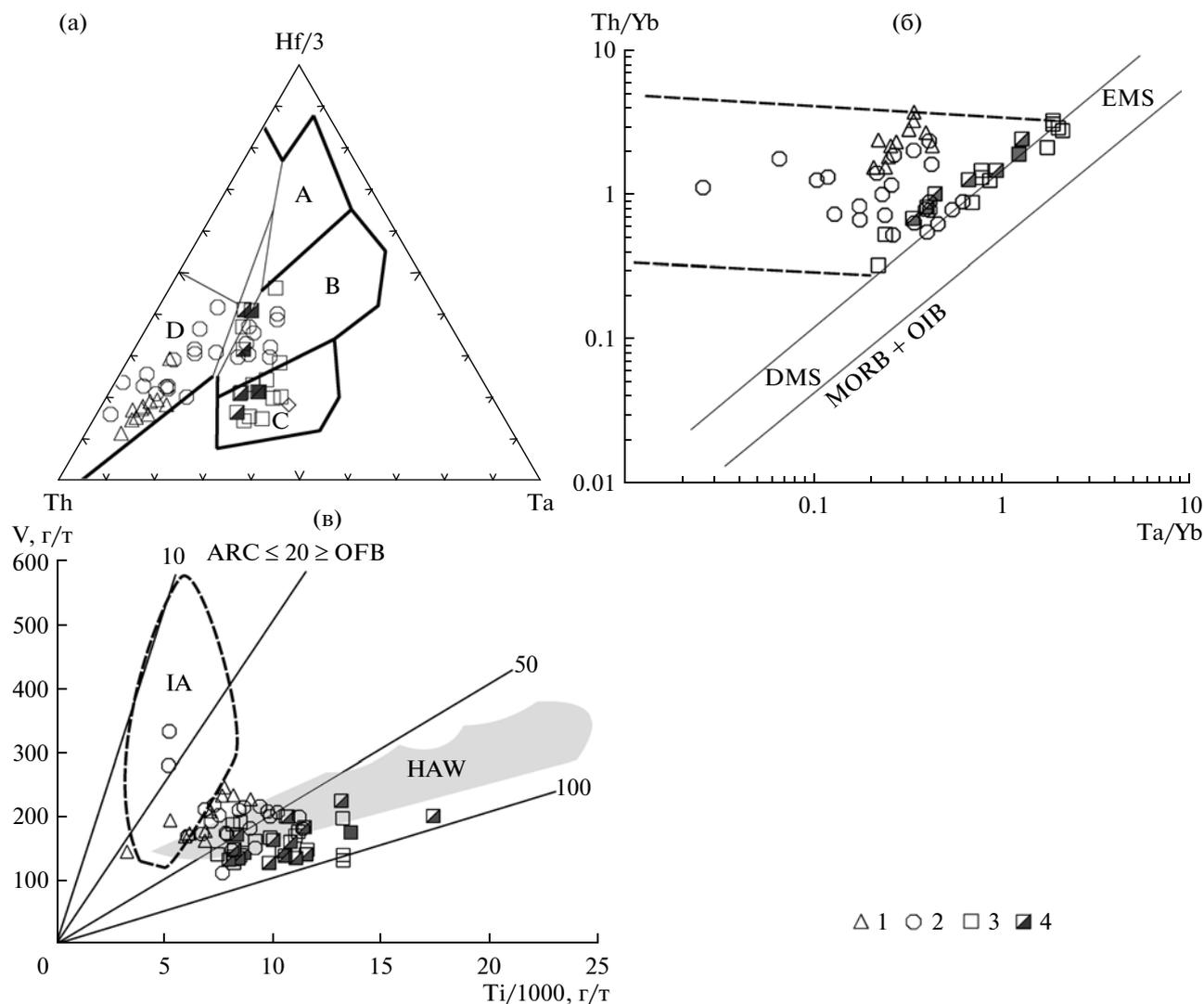


Рис. 3. Классификационные диаграммы Th–Hf–Ta (Wood, 1980), Th/Yb–Ta/Yb (Pearce, 1983) и V–Ti (Shervais, 1982) для разновозрастных базальтоидов Восточного Сихотэ-Алиня.

1 – позднемеловые; 2 – эоцен-олигоцен-раннемиоценовые; 3–4 – позднемiocен-плиоценовые Совгаванское и Нельминское плато (3), Шкотовское, Шуфанское и Острогорское плато, Вострещовская группа вулканов (4).

(а) – поля – области вариации составов – срединно-океанических хребтов (А), океанических островов (В), внутриплитных обстановок (С), островных дуг и активных континентальных окраин (D). (б): DMS – деплетированная мантия; EMS – обогащенная мантия. MORB + OIB – поле базальтов срединно-океанических хребтов и океанических островов. (в) – поля базальтов островных дуг (IA) и Гавайских островов (HAW).

Литературный источник: (Мартынов 1999; Мартынов и др., 2002; Симаненко и др., 2006).

развивающихся над древними зонами субдукции в активном динамическом режиме, более информативны возрастные вариации составов. В отличие от надсубдукционных позднемеловых эффузивов, фигуративные точки эоцен-олигоцен-раннемиоценовых базальтов на классификационных диаграммах формируют тренды, отчетливо смещенные в поля внутриплитных магм (рис. 3).

Вариации отношений радиогенных изотопов Sr, Nd и Pb (рис. 4) в описываемых породах описываются смешением деплетированного (DMM) и обогащенного (EMII) источников. В пределах

восточной Евразии EMII изотопный компонент локализован в субконтинентальной литосфере (Flower et al., 1998). Природа DMM мантии в литературе детально не рассматривалась. Для Восточного Сихотэ-Алиня ее можно реконструировать по особенностям возрастных вариаций составов пород (рис. 5). Временному интервалу максимальной вулканической активности (~37–35 млн. лет) соответствует резкое уменьшение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Th/Nb, La/Yb отношений и возрастание – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в излившихся породах, что дает основание предполагать возрастание роли DMM-типа

источника в магмогенезисе. В этом же интервале закономерно падает и $\Delta 8/4\text{Pb}$ отношение (рис. 6), что, с учетом конфигурации границы мантийных доменов Индийского и Тихоокеанского MORB в Северо-Западной Пацифике, свидетельствует об океанической природе деплетированного компонента. Взаимодействие астеносферы Тихого океана с субконтинентальной литосферой (EMII) возможно только после разрушения субдукционной пластины и образования слэб-виндоу (Ханчук, Мартынов, 2011).

Закономерные вариации составов установлены и для эоцен-олигоцен-раннемиоценовых интрузивных пород. Их кристаллизация, в отличие от надсубдукционных позднемиоценовых магматитов, происходила в восстановленном режиме (ильменитовая серия), при активном участии в магмогенезисе деплетированной мантии с низкими содержаниями радиогенного Sr и высокими — радиогенного Nd (Валуй, 2011).

Петрологические особенности эоцен-олигоцен-раннемиоценового базальтоидов Восточного Сихотэ-Алиня во многом сходны с таковыми кайнозойских вулканитов калифорнийской окраины (Симоненко и др., 2002). Их формирование происходило в режиме скольжения океанической плиты, образования слэб-виндоу, внедрения в субконтинентальную литосферу океанической астеносферы. В результате сложных динамических процессов здесь образовались разнообразные природные комплексы, общей чертой которых является смешение внутриплитных, субдукционных и срединно-океанических геохимических характеристик.

В таблице приведены сравнительные геологические и геохимические признаки вулканитов субдукционных обстановок и зон скольжения литосферных плит. Их можно считать в значительной степени генерализованными, поскольку составы излившихся пород обстановок скольжения могут варьировать в широком диапазоне в зависимости от предшествующей геологической истории, динамики разрушения субдуцирующей плиты, состава астеносферного диапира, надсубдукционного мантийного клина и слэба.

Позднемиоцен-плиоценовые платобазальты Восточного Сихотэ-Алиня рассматриваются как типичные внутриплитные образования. В пределах континентальной части Евразии их происхождение связывают либо с локальным растяжением литосферы в результате Индо-Азиатской коллизии (например, Zhou, Armstrong, 1982; Flower et al., 1998 и др.), либо с активностью плюмовых источников (Deng et al., 1998; Ярмолюк, Коваленко, 1995 и др.). Данные, полученные по Восточному Сихотэ-Алиню, позволяют критически рассмотреть обе эти модели.

В пределах юга Дальнего Востока России, частью которой является и Восточный Сихотэ-Алинь, петро- и геохимические характеристики

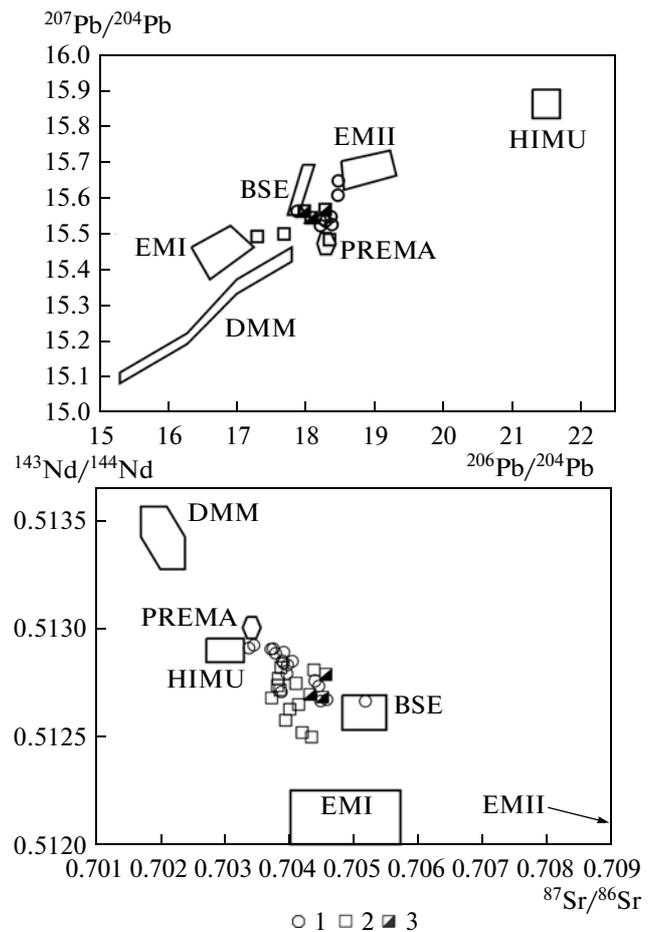


Рис. 4. Изотопные отношения $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в кайнозойских базальтоидах Восточного Сихотэ-Алиня.

1 — эоцен-олигоцен-раннемиоценовые; 2–3 — позднемиоцен-плиоценовые Совгаванское и Нельминское плато (2), Шкотовское, Шуфанское и Острогорское плато, Вострецовская группа вулканов (3).

Поля изотопных компонентов по (Zindler, Hart, 1986; Rollinson, 1993) с небольшими изменениями.

позднемиоцен-плиоценовых платобазальтов отчетливо коррелируют с размерами вулканических полей. Крупные плато, расположенные вдоль побережья Японского моря и Татарского пролива, отличаются не только высокой объемной долей низкокальциевых базальтов, но и аномально низкими, сопоставимыми с MORB, концентрациями в них оксида калия (до 0.12 мас. %) (Мартынов, 1999). Учитывая изотопные признаки обогащенного источника (рис. 4), этот факт свидетельствует о высоких температурах и степени плавления мантийного вещества вблизи береговой полосы, что, в свою очередь, предполагает важную роль в позднекайнозойском магмогенезисе предшествующих тектоно-магматических событий, связанных с позднемиоценовой-раннекайнозойской вулканической активностью и раскрытием Япономор-

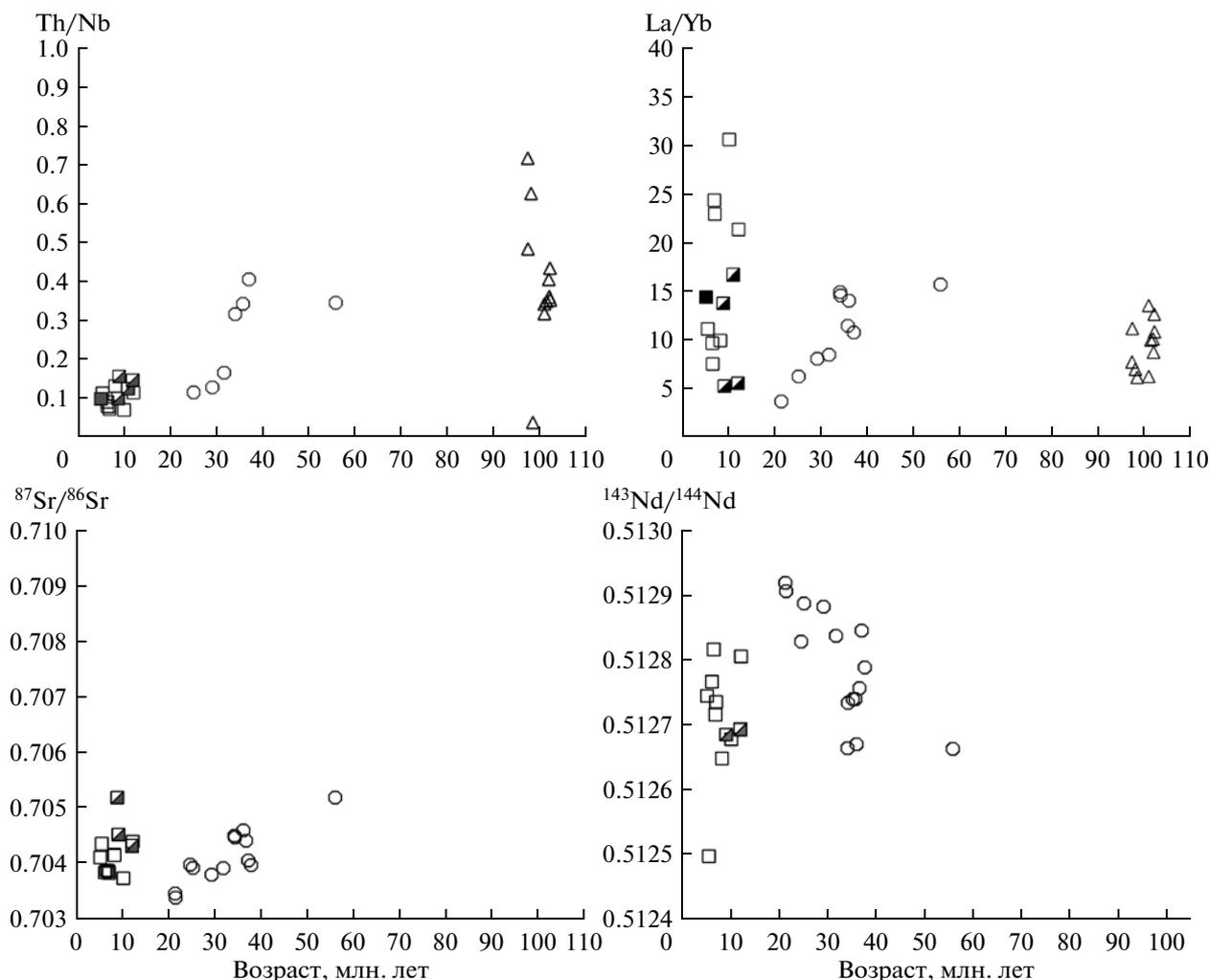


Рис. 5. Вариации геохимических и изотопных характеристик кайнозойских базальтоидов Восточного Сихотэ-Алиня в зависимости от возраста.

Условные обозначения см. рис. 3.

Литературный источник: (Мартынов, 1999; Okamura et al., 2005).

ской котловины. Такое заключение косвенно подтверждают температурные аномалии в областях Японского моря, непосредственно прилегающих к крупным позднекайнозойским вулканическим ареалам (Веселов и др., 1992) и проявлениями в береговой полосе термальных вод (до 54°C) (Кирюхин, Резников, 1962). В пределах Китая и Кореи высокая объемная доля низкокальциевых базальтов также характерна для лавовых полей, расположенных вблизи побережья Южно-Китайского (п-ов Лейчжоу, о-ва Хайнань) (Fan, Hooper, 1991) и Японского (о-в Чейджу) (Lee et al., 1994, Park, Kwon, 1996) морей.

Близкие к обогащенной мантии изотопные и микроэлементные характеристики внутриплитных континентальных базальтов (Turner, Hawkesworth, 1995), значительная вариабельность составов выносимых ксенолитов (Harte, 1983; Menzies, 1983; Nixon, 1987), дают основание многим ис-

следователям предполагать значительный вклад в магмогенез гетерогенной континентальной литосферы (Hawkesworth et al., 1983; Menzies, 1983; Brandshaw et al., 1993; Turner, Hawkesworth, 1995 и др.). Для южной части Дальнего Востока России этот вывод подтверждается отчетливыми субдукционными признаками, проявленными в позднекайнозойских платобазальтах (Мартынов и др., 2002; Чашин и др., 2007). Низкокальциевые лавы Совгаванского плато, формирующиеся в области предшествующей субдукции, обогащены LILE и деплетированы HFSE (рис. 7). К западу, по направлению к Острогорскому плато и Вострцовской группе вулканов, субдукционные метки постепенно нивелируются, что позволяет предполагать вовлечение в магмогенез литосферной мантии, преобразованной позднемеловой субдукцией, имевшей западное направление.

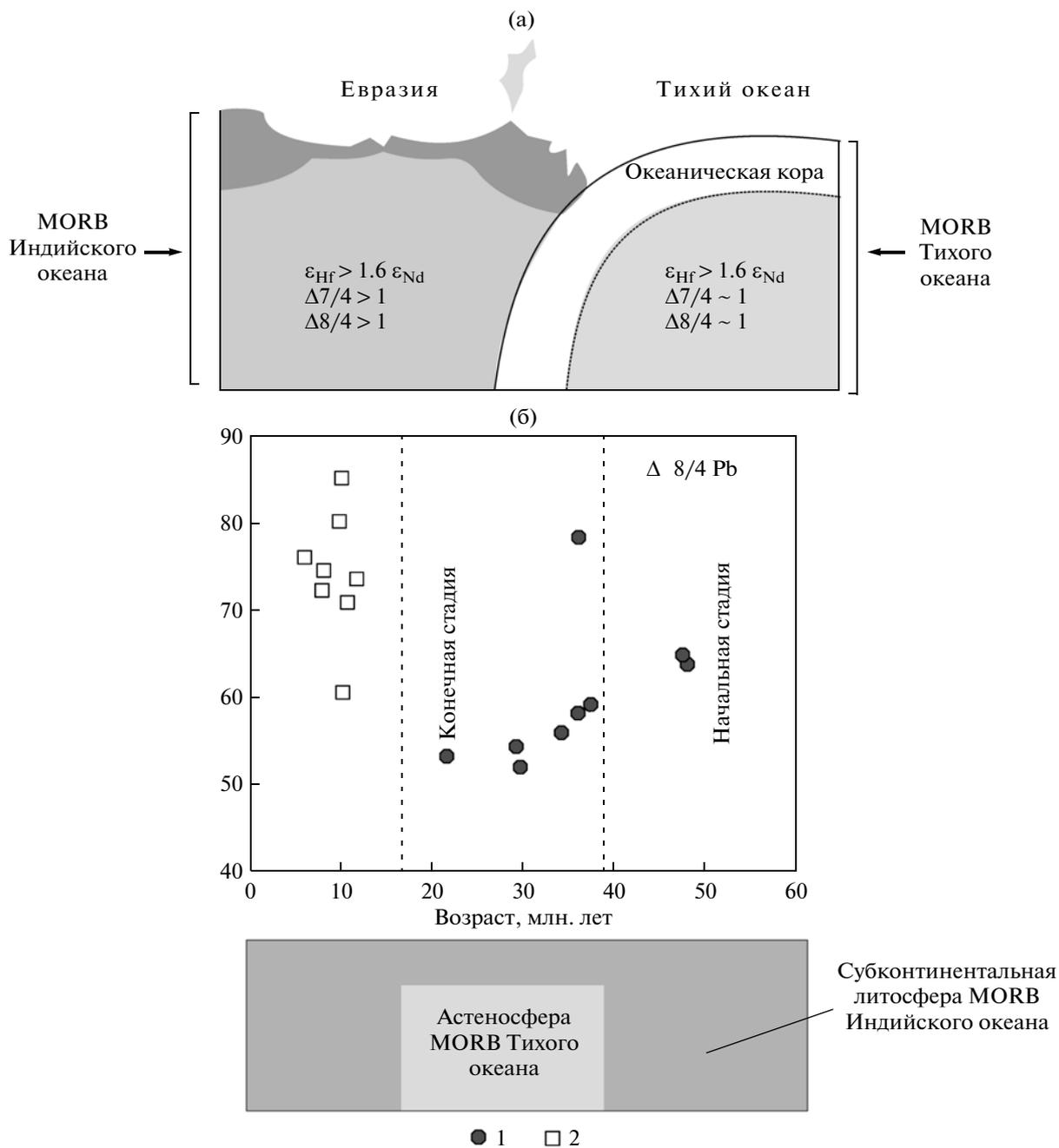


Рис. 6. Современная локализация мантийных доменов MORB Тихого и Индийского океанов в пределах Северо-Западной Пацифики (а) и вариации отношения $\Delta 8/4 \text{ Pb}$ в кайнозойских базальтоидах Восточного Сихотэ-Алиня в зависимости от возраста (б).

1–2 – этапы вулканизма: эоцен-олигоцен-раннемиоценовый (1), позднемioцен-плиоценовый (2).

Субдукционные геохимические признаки проявлены и в платобазальтах южной части Приморья, в которых уменьшение Ва/La отношения происходит с запада на восток, от Шуфанского к Шкотовскому плато (рис. 7). Восточное направление субдукции имела Солонкерская палеоокеаническая плита, погружавшаяся под Амурский микроконтинент в пермское время. Следы этого

события трассируются фрагментами вулканических поясов и аккреционных призм (иногда с офиолитами) в Корее и Юго-Западной Японии (Парфенов и др., 2003; Khanchuk, 2001).

Дополнительную информацию о динамике мантийных процессов, роли литосферной и астеносферной мантии в магмогенезисе, дают изотопные характеристики позднекайнозойских лав.

Сравнительная геологическая и геохимическая характеристика магматических проявлений в зонах субдукции и скольжения литосферных плит, по (Ханчук, Мартынов, 2011) с дополнениями

| Магматизм границ погружения (субдукции) океанической плиты | Магматизм границ скольжения плит |
|---|--|
| <i>Источники</i> | |
| Надсубдукционный мантийный клин, субдуцирующая океаническая плита (слэб) | Палеосубдукционный клин, погруженная литосферная плита (слэб), океаническая и континентальная астеносферы |
| <i>Вулканические структуры</i> | |
| Протяженные линейные вулканические пояса, субпараллельные глубоководному желобу | Варьирующие по размерам вулканические ареалы в пределах локальных зон растяжения |
| <i>Вулканические извержения</i> | |
| Центрального типа (стратовулканы) с преимущественно эксплозивным вулканизмом. Гомодромной последовательностью формирования базальт-андезит-риолитовых серий | Центрального (щитовые вулканы) или ареального типов, бимодальные (базальт-риолитовые), либо базальтовые ассоциации субшелочного или щелочного типов. Антидромная последовательность формирования |
| <i>Геохимические характеристики</i> | |
| Поперечная геохимическая зональность. Базальты низкощелочного или субщелочного типов, окислительные условия кристаллизации. Высокие концентрации в базальтах Al_2O_3 (>17 мас. %), низкие Ni (<20–30 г/т) и TiO_2 (<1 мас. %). Низкие отношения Ni/Co (<1), Ti/V (<0.04), Th/La (0.2–0.3), Nb/La (0.2–0.5), но высокие – Ba/La (20–30). | Базальты субщелочного или щелочного типов, от OIB и MORB до высокоглиноземистых, восстановительные условия кристаллизации. Низкие по сравнению с островодужными, содержания Al_2O_3 (16–17 мас. %), но высокие – Ni (<30–50 г/т), TiO_2 (1–2 мас. %); высокие Ni/Co (>1), Ti/V (<0.04), Th/La (0.13–0.2), Nb/La (0.25–0.35), Ba/La (20–25) отношения. Вариации составов пород во времени и пространстве. |

Отношение $\Delta 8/4Pb$ во всех типах молодых вулкаников варьирует от 60 до 85, что подтверждает преобладающую роль в магмогенезисе субконтинентальной мантии индийского MORB-типа. На диаграмме $^{143}Nd/^{144}Nd$ – $^{87}Sr/^{86}Sr$ (рис. 4) фигуративные точки щелочных и субщелочных базальтов, как и предшествующих эоцен-олигоцен-раннемиоценовых вулкаников, располагаются вблизи линии смещения EMI и DMM изотопных компонентов, характеризующих гетерогенную литосферу. Иная картина наблюдается для низкокальциевых базальтов. Эти породы, с устойчиво более низкими отношениями $^{143}Nd/^{144}Nd$, смещены к низко-Nd тренду, образованному в результате смешения NIMU и EMI мантийных источников.

Астеносферная или плюмовая природа EMI мантии (DUPAL аномалия) в Восточной Евразии и Западной Пацифики до сих пор является предметом дискуссии (Storey et al., 1989; Mahoney et al., 1992; Tatsumoto, Nakamura, 1991, Flower et al., 1998 и др.). Ключевые различия этих двух источников заключаются, в конечном счете, в температурах и давлениях генерации первичных магм. Для позднемиоцен-плиоценовых платобазальтов Восточного Сихотэ-Алиня оценка этих параметров была выполнена с использованием экспериментально откалиброванного геобарометра, описанного в работе (Lee et al., 2009). Природные магнезиальные базальты ($MgO > 8.5$ мас. %) пересчитывались на условия равновесия с оливинном Fo_{89} . Такой оливин преобладает в лерцолито-

вых включениях позднекайнозойских щелочных лав Приморья (Чащина А.А., устное сообщение). Согласно полученным данным, в безводных условиях генерация первичных магм должна была происходить в температурном интервале ~1280–1540°C и давлении ~1.3–4.1 ГПа (~48–140 км), со степенью плавления превышающей 10 об. %. Выплавление пикритбазальтов западных лавовых полей происходило на сухом перидотитовом солидусе, при высоких температурах и давлениях (рис. 8). Рассчитанные потенциальные температуры мантии (1320–1480°C) превышали таковые для MORB (1300–1400°C), но почти на 200°C были ниже плюмовых базальтов Гавайских островов (~1500–1600°C). Ближайшими аналогами позднекайнозойских вулкаников Восточного Сихотэ-Алиня по температурам и давлениям генерации являются базальты зон растяжения Северо-Американских Кордильер (1350–1450°C, 1.5–3.3 ГПа) (Lee et al., 2009) и Вьетнама (Flower et al., 1998) (рис. 8, 9).

ПЕТРОГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Современная модель развития Восточного Сихотэ-Алиня в кайнозой в кратком виде описана в работе (Ханчук, Мартынов, 2011). Ниже она приводится в развернутом виде с более детальным описанием основных этапов этого процесса.

Восточно Сихотэ-Алинский вулканический пояс представляет собой полигенную структуру, в которой пространственно совмещены магматические

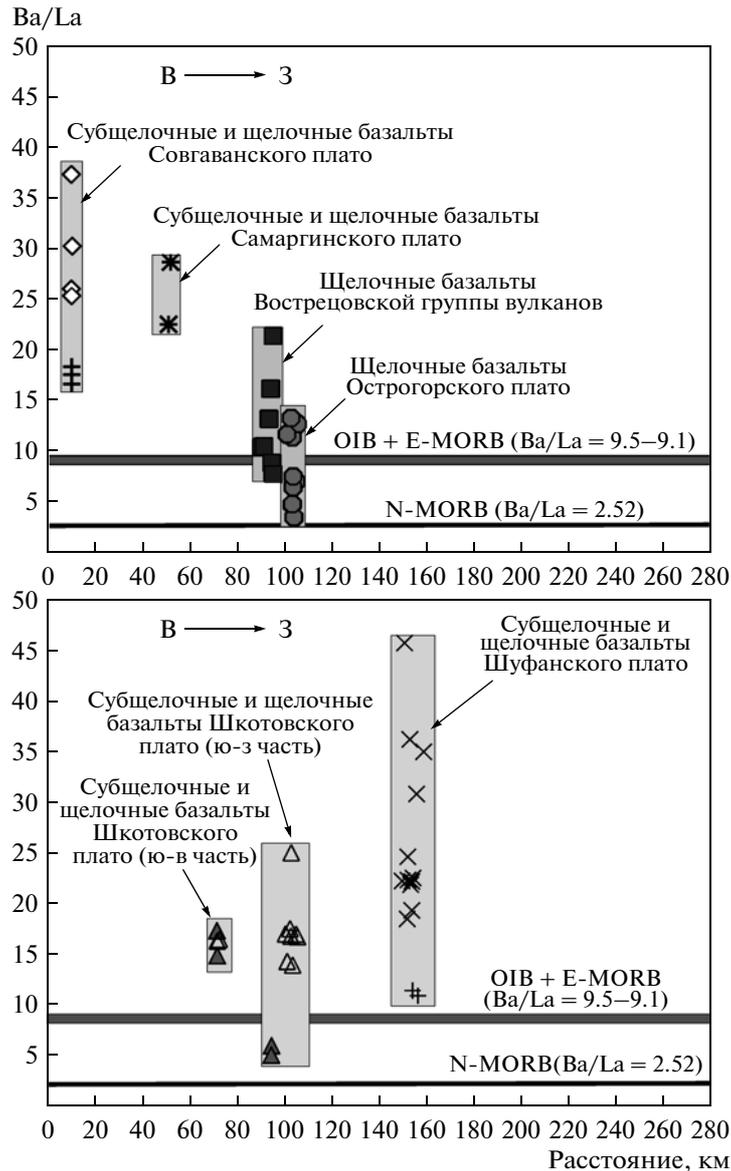


Рис. 7. Вариации Ba/La отношения в позднекайнозойских субщелочных и щелочных базальтоидах юга Дальнего Востока в зависимости от их расположения относительно побережья Японского моря и Татарского пролива, по (Чашин и др., 2007).

образования различных геодинамических этапов развития восточной окраины Евразии. К собственно поясовым можно отнести только позднемеловые вулканиды, сформированные в надсубдукционной обстановке (рис. 10). Преобладание среди них кислых эффузивов, латеральные вариации составов, связаны с вовлечением в магмогенезис континентальной коры двух различных террейнов – Нижнеамурского на севере и Кемского на юге.

Смену геодинамического режима в пределах рассматриваемой территории следует, по-видимому, относить не к миоцену или эоцену, а к границе мезозоя и кайнозоя. Распространение кайнозойских вулканидов, включая маастрихт-датские андезиты, выходит далеко за пределы ареала позднеме-

ловых субдукционных пород, что не типично для надсубдукционных лав. Источником первичных магм маастрихт-датских андезитов, по-прежнему, являлся надсубдукционный мантийный клин, но, в условиях нарастающего растяжения, базальтовые расплавы проникали глубоко в верхние горизонты континентальной коры, взаимодействовали с окружающими породами, формируя гибридные андезитовые магмы.

В эоцене процесс растяжения усиливался. Массовое внедрение основных расплавов приводило к масштабному плавлению континентальной коры, одновременному излиянию на поверхность основных и кислых магматитов, формированию бимодальной вулканической ассоциации.

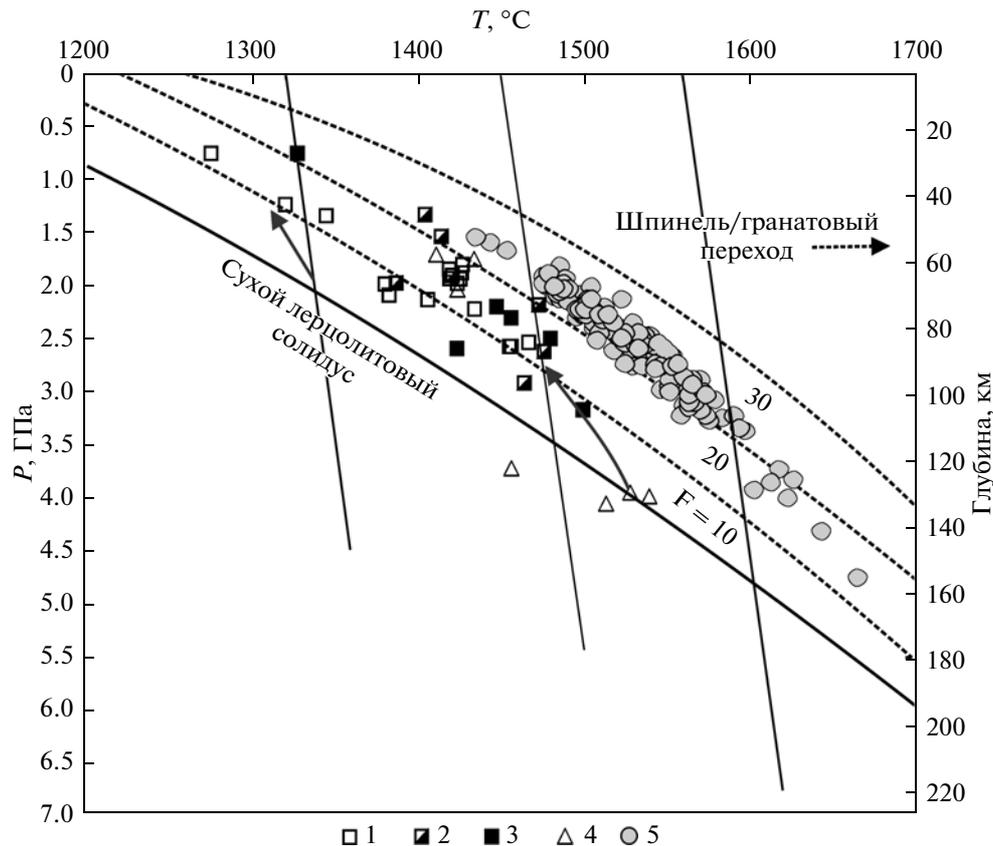


Рис. 8. Рассчитанные температуры и давления генерации первичных магм позднемиоцен-плиоценовых платобазальтов юга Дальнего Востока.

Сплошная линия – сухой перцолитовый солидус, пунктирные – изоплеты различных фракций плавления по (Lee et al., 2009). Стрелками показаны адиабаты расплавов, тонкие почти вертикальные линии – адиабаты твердого мантийного вещества.

1 – Совгаванское плато; 2 – Шкотовское плато; 3 – Шуфанское плато; 4 – Острогорское плато и Вострецовская группа вулканов; 5 – базальты щитовой стадии Гавайев, по (Lee et al., 2009).

Пик эоцен-олигоцен-раннемиоценовой базальтовой активности (~37–35 млн. лет) соответствовал максимальному растяжению литосферы, разрыву позднемелового слэба, образованию слэб-виндоу, внедрению в литосферную мантию горячей океанической астеносферы (рис. 10). Вовлечение в магмогенезис различных источников приводило к формированию расплавов, значительно варьирующих по геохимическим и изотопным характеристикам.

Хотя позднемиоцен-плиоценовая магматическая активность в Восточном Сихотэ-Алине происходила после раскрытия Япономорской котловины, состав образующихся магм во многом определялся предшествующими тектоно-магматическими событиями. Участие в магмогенезисе континентальной астеносферы с ЕМІ изотопными характеристиками указывает на смену направлений мантийных потоков, связанную с блокирующим влиянием новой сформированной восточной зоны субдукции (рис. 10).

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Важнейшим направлением дальнейших исследований является продолжение изотопного датирования разновозрастных вулканогенных толщ, с целью уточнения временных интервалов смены геодинамических режимов.

Необходимо наращивать усилия по изотопно-геохимическому исследованию эоцен-олигоцен-раннемиоценовых базальтов, ключевых для понимания кайнозойской геодинамики. Крайне важным представляется постановка комплексных геолого-геохимических работ в пределах самого крупного, труднодоступного и слабо изученного вулканического ареала, расположенного к северу от р. Тумнин. В 80-х годах прошлого столетия новосибирские геологи выполнили описание береговых обнажений этой территории (Есин, 1988; Есин и др., 1992), но полученные ими аналитические данные немногочисленны и выполнены устаревшими инструментальными методами.

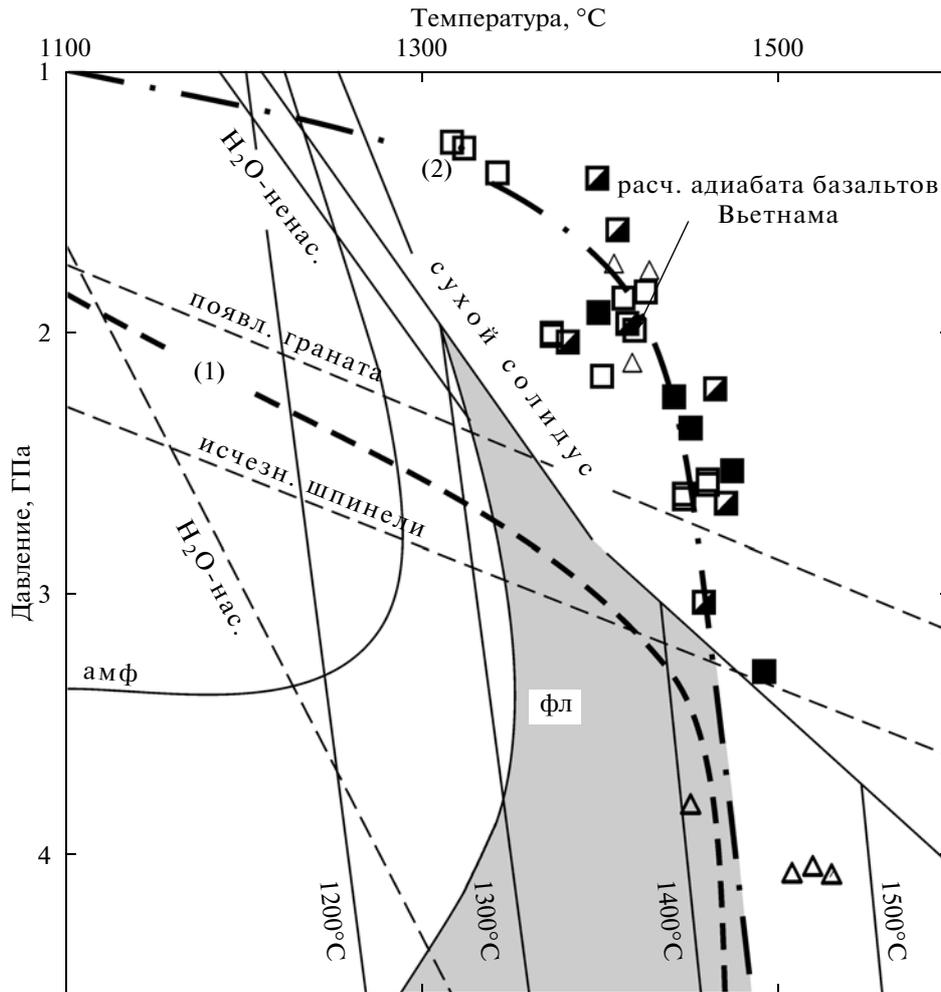


Рис. 9. *P-T* диаграмма для примитивных базальтов зон растяжения Вьетнама, по (Flower et al., 1998), рассчитанная из предположения потенциальной температуры астеносферы, равной 1440°C.

Адиабатические астеносферные геотермы (1) и (2) соответствуют коэффициентам растяжения (β) – 1 и 2.5 соответственно. На диаграмме показан экспериментально установленный солидус обогащенного перидотита НК-66, поля стабильности флогопита (фл) и амфибола (амф), шпинель-гранатовый переход. Серым цветом залита область плавления в насыщенных водой условиях.

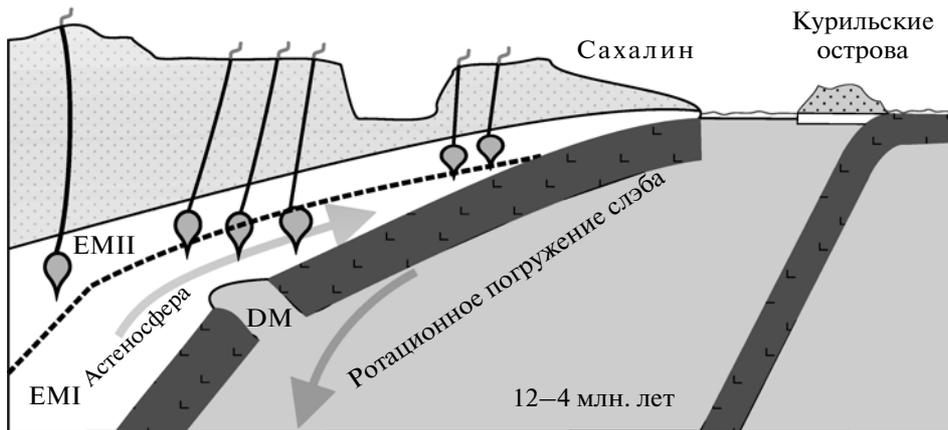
Условные обозначения см. рис. 8.

Для уточнения состава и эволюции позднекайнозойских базальтов крайне важным является изотопно-геохимическое изучение двух крупных плато южного Приморья (Шкотовское и Шуфанское), а также небольших вулканических ареалов западных континентальных районов.

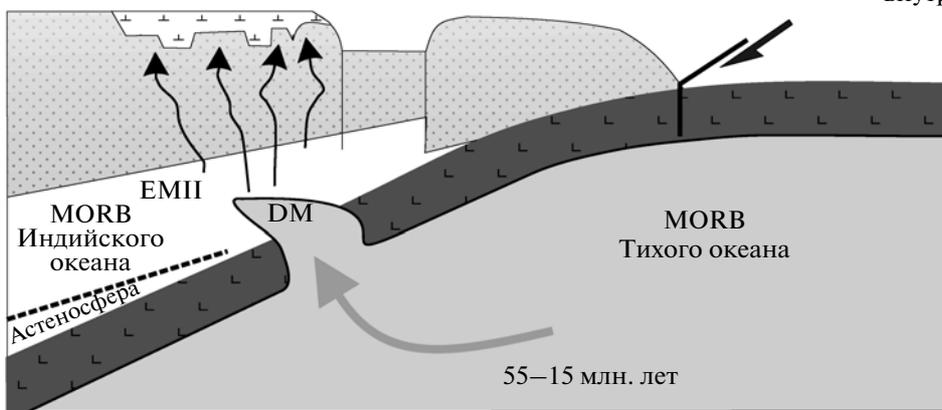
Особый интерес представляют магматические образования неясного возраста и генезиса в тылу Восточно Сихотэ-Алинского вулканогена. На синколлизонном этапе развития юго-восточной Азии, в тыловой зоне орогенных поясов формировались ареалы специфических вулкаников – шошонитов (Flower et al., 1998). Их происхождение связывают с разрывом древних субдукционных пластин, сложным взаимодействием континентальных и океанических астеносферных потоков. В пределах юга Дальнего Востока России породы подобного

типа не выявлены. В тыловой зоне вулканогенного пояса в последнее время стали выделяться эоценовые (45.52 ± 1.1 млн. лет) адакиты (Симаненко и др., 2011; Чашин и др., 2011). По уровню содержания большинства микроэлементов и величине Sr/Y отношения (70–82) эти породы близки палеогеновым адакитовым лавам Северо-Восточного Китая, массива Китаками в Японии и северо-западной окраины Северной Америки, образованных в результате разрыва субдуцированной плиты (слэб-виндоу). Но требуют дополнительные, более детальные изотопные исследования этих необычных пород, чтобы понять их природу.

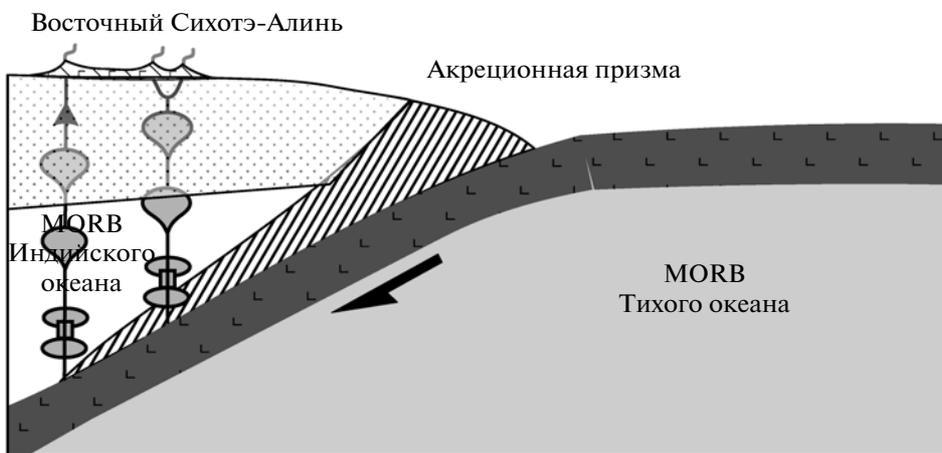
Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10-05-00180-а, проектов ДВО № 12-1-0-08-025 и № 09-2-СО-08-002.



Поздний миоцен-плиоцен
внутриплитный вулканизм



Эоцен-олигоцен-ранний миоцен
режим скольжения
литосферных плит



Поздний мел
субдукционный режим

Рис. 10. Модель развития Восточного Сихотэ-Алиня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брант И.С., Рассказов С.В., Попов В.К., Брант С.Б. Калиевая специфика базальтов Синеутесовской впадины: геохимические корреляции и проблемы калий-аргонового датирования (Южное Приморье) // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 4. С. 75–89.

Валуй Г.А. Восточно-Сихотэ-Алинский вулcano-плутонический пояс (поздний сенoman–маастрихт). Интрузивные образования // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. 2004. Т. 1. С. 281–287.

Валуй Г.А. Гранитообразование в зоне перехода континент–океан по данным Sm-Nd-Sr-O изотопии // Геологические процессы в зонах субдукции, коллизии и

- скольжения литосферных плит (материалы Всероссийской конференции с международным участием, Владивосток, 20–23 сентября 2011 г.). Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 181–183
- Веселов О.В., Гордиенко В.В., Соинов В.В.* Обобщение данных по тепловому потоку // Тектоносфера тихоокеанской окраины Азии. Владивосток: Дальнаука, 1992. С. 115–121.
- Глубинное строение Приморья (по данным ГСЗ). М.: Наука, 1976. 80 с.
- Голозубов В.В.* Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
- Есин С.В.* Петрология кайнозойских базальтоидных формаций средней части Восточного Сихотэ-Алиня: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГиГ, 1988. 25 с.
- Есин С.В., Прусевич А.А., Кутюлин В.А.* Позднекайнозойский вулканизм и глубинное строение Восточного Сихотэ-Алиня. Новосибирск: Наука, СО, 1992. 158 с.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Наталин Л.М.* Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. Т. 2. 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.
- Лишевский Э.Н.* Основные черты тектоники и глубинное строение континентальной части Дальнего Востока СССР по гравиметрическим данным // Строение и развитие земной коры на советском Дальнем Востоке. М.: Наука, 1969. С. 21–31.
- Мартынов Ю.А.* Петрология эоцен-миоценовой контрастной формации Нижнего Приамурья. Владивосток: ДВО РАН СССР, 1983. 140 с.
- Мартынов Ю.А.* Геохимия базальтов активных континентальных окраин и зрелых островных дуг на примере северо-западной Пацифики. Владивосток: Дальнаука, 1999. 215 с.
- 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. 5–22.
- Мартынов Ю.А., Чащин А.А., Рассказов С.В., Саранина Е.В.* Позднемиоцен-плиоценовый базальтовый вулканизм юга Дальнего Востока России как индикатор гетерогенности литосферной мантии в зоне перехода континент–океан // Петрология. 2002. Т. 10. № 2. С. 189–209.
- Мартынов Ю.А., Ли Д.У., Голозубов В.В., Рассказов С.В.* Геохимия и особенности формирования позднемеловых-миоценовых базальтов юга Корейского полуострова // Геохимия. 2006. № 6. С. 597–609.
- Мартынов Ю.А., Чащин 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.
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И. и др.* Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 7–41.
- Попов В.К.* Петрология палеоген-неогеновых вулканических комплексов Восточного Сихотэ-Алиня. Владивосток: ДВО АН СССР, 1986. 152 с.
- Рассказов С.В., Приходько В.С., Ясыгина Т.А. и др.* Мантийные источники кайнозойских вулканических пород района оз. Кизи (Восточный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 5. С. 94–121.
- 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.
- Симаненко В.П., Попов В.К., Чащин А.А.* Маастрихтский вулканизм Сихотэ-Алиня: геохимические свидетельства перестройки геодинамического режима региона на рубеже мезозоя и кайнозоя // Геологические процессы в зонах субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит (материалы Всероссийской конференции с международным участием, Владивосток, 20–23 сентября 2011 г.). Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 294–297.
- Ханчук А.И.* Геологическое строение и развитие континентального обрамления северо-запада Тихого океана: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 1993. 31 с.
- Ханчук А.И.* Тектоника и магматизм палеотрансформных континентальных окраин калифорнийского типа на Востоке России // Общие вопросы тектоники. Тектоника России. Материалы XXXIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2000. С. 544–547.
- 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, 20–23 сентября 2011 г.). 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.
- Чащин А.А., Мартынов Ю.А., Рассказов С.В. и др.* Изотопно-геохимическая характеристика позднемиоценовых субщелочных и щелочных базальтов юга Дальнего Востока России как показатель роли континентальной литосферы в их происхождении // Петрология. 2007. Т. 15. № 6. С. 656–681.
- Чащин А.А., Нечаев В.П., Нечаева Е.В., Блохин М.Г.* Находка эоценовых адакитов в Приморье // Докл. АН. 2011. Т. 438. № 5. С. 1–6.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И.* Позднемезозойский-кайнозойский внутриплитный магматизм Центральной и Восточной Азии // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С. 132–141.
- Brandshaw T.K., Hawkesworth C.J., Gallagher K.* Basaltic volcanism in the Southern Basin and Range: no role for a mantle plume // Earth Planet. Sci. Lett. 1993. V. 116. P. 45–62.
- 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. Flower M.F., Chung S.-L., Lo C.-H., Lee T.-Y. Amer. Geoph. Union. Washington D. C. 1998. Geodynamics ser. V. 27. P. 59–67.

- Dewey J.F., Candle S., Pitman W.* Tectonic evolution of the India-Eurasia collision Zone // *Ecolgae Geol. Helv.* 1989. V. 82. P. 717–734.
- Fan Q., Hooper P.R.* The Cenozoic basaltic rocks of Eastern China: Petrology and chemical composition // *J. Petrology.* 1991. V. 32. P. 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. Flower M.F., Chung S.-L., Lo C.-H., Lee T.-Y. Amer. Geoph. Union. Washington D. C. 1998. Geodynamics ser. V. 27. P. 67–89.
- Harte B.* Mantle peridotites and processes – the kimberlite samples // *Continental basalts and mantle xenoliths.* Eds. Hawkesworth C.J., Norry M.J. Nantwich: Shiva, 1983. P. 46–91.
- Hawkesworth C.J., Erlank A.J., Marsh M.A. et al.* Evolution of the continental lithosphere: evidence from volcanics and xenoliths in Southern Africa // *Continental basalts and mantle xenoliths.* Eds. Hawkesworth C.J., Norry M.J. Nantwich: Shiva, 1983. P. 111–138.
- Hirooka K.* Neogene paleoposition of the Japanese islands inferred from paleomagnetic studies // *Neogene biotic evolution and related events.* Osaka: Museum of Natural History Special Publication, 1988. P. 3–16.
- Isezaki N.* A magnetic anomaly map of the Japan Sea // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1986. V. 38. P. 403–410.
- Geology of Korea. Seoul: Keohak-Sa Publishing Co, 1987. 482 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 // *International Field Conference in Vladivostok, Russia: 1–12, September, 1998.* P. 25–31.
- Khanchuk A.I.* Pre-Neogene tectonics of the Sea of Japan region: a view from the Russian side // *Earth Sci.* 2001. V. 55. № 5. P. 275–291.
- Kono M.* Magnetic anomalies in the Sea of Japan: A speculation on the tectonic history // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1986. V. 38. P. 411–426.
- 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. Geological Soc. Japan.* 1986. V. 92. P. 205–217.
- Lee M.W., Won C.K., Lee D.Y. et al.* Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in southern Cheju island, Korea // *J. Geological Soc. Korea.* 1994. V. 30. P. 521–541.
- Lee C.-T.A., Luff P., Plank T. et al.* Constraints on the depths and temperatures of basaltic magma generation on Earth and other terrestrial planets using new thermobarometers for mafic magmas // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 279. P. 20–33.
- Mahoney J., LeRoex A.P., Peng Z. et al.* Southwestern limits of Indian Ocean ridge mantle and the origin of low-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb mid-ocean ridge basalt: isotope systematic of the central Southwest Indian Ridge 9170–500 E // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № 19. P. 771–719.
- Menzies M.A.* Mantle ultramafic xenoliths in alkaline magmas: evidence for mantle heterogeneity modified by magmatic activity // *Continental basalts and mantle xenoliths.* Eds. Hawkesworth C.J., Norry M.J. Nantwich: Shiva, 1983. P. 92–110.
- Nixon P.H.* Mantle xenoliths. Chichester: Wiley, 1987. 844 p.
- 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. et al.* Asthenospheric injection and back-arc opening: isotopic evidence from Northeast Japan // *Chemical. Geology.* 1988. V. 68. P. 317–327.
- Okamura S., Arculus R.J., Martynov Yu.A.* Cenozoic magmatism of the North-Eastern Eurasian margin: the role of lithosphere versus asthenosphere // *J. Petrology.* 2005. V. 46. № 2. P. 221–253.
- 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 for stratigraphically-controlled lavas from the Northern Part of Cheju island // *J. Geological. Soc. Korea.* 1996. V. 32. P. 223–249.
- Pearce J.A.* Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins // *Continental basalts and mantle xenoliths,* Eds. Hawkesworth C.J., Norry M.J. Nantwich: Sica Publ., 1983. P. 230–249.
- Rollinson H.* Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group UK Limited, 1993. 343 p.
- Shervais I.W.* Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1982. V. 59. № 1. P. 101–118.
- 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. Mineral. Petrol. Econom. Geol.* 1992. V. 87. P. 165–173.
- Storey M., Saunders A.D., Tarney J. et al.* Contamination of Indian ocean asthenosphere by the Kerguelen-Heard plume // *Nature.* 1989. V. 338. P. 574–576.
- Tapponnier P., Peltzer G., Armijo R.* On the mechanics of the collision between India and Asia // *Collision tectonics.* Eds. Coward M.P., Ries A.C. Geol. Soc. Spec. Publ. London. 1986. P. 115–157.
- Tatsumoto M., Nakamura Y.* DUPAL anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin // *Geochem. Cosmochem. Acta.* 1991. V. 55. P. 3697–3708.
- Tosha T., Hamano Y.* Paleomagnetism of Tertiary rocks from the Oga Peninsula and the rotation of northeast Japan // *Tectonics.* 1988. V. 7. № 3. P. 653–662.
- Turner S., Hawkesworth C.* The nature of the sub-continental mantle: constraints from the major-element composition of continental flood basalts // *Chemical. Geology.* 1995. V. 120. P. 295–314.
- Wood D.A.* The application of Th-Hf-Ta diagram to problem of tectonomagmatic classification and to establish the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1980. V. 50. P. 11–30.
- Zindler A., Hart S.R.* Chemical geodynamics // *Annual Rev. Earth Planet. Sci.* 1986. V. 14. P. 493–571.
- 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.