

Эволюция Тихоокеанского суперплюма в период с позднего протерозоя до мезозоя и его воздействие на окружающую среду по данным петрологического и геохимического изучения океанических базальтов и карбонатных отложений

Итоговый отчет за период 2007-2009

Объявленные ранее цели проекта на 2008 год:

Основной задачей проекта было объявлено изучение возможной связи магматической активности Тихоокеанского суперплюма с изменениями окружающей среды в период с позднего протерозоя до мезозоя на основе геологических и геохимических данных по плюмовым (внутриплитным) базальтам и карбонатным отложениям, входящим в состав аккреционных комплексов Алтае-Саянской области, Восточного Казахстана, Монголии и Японии. В связи с поставленной задачей в ходе работ второго года особое внимание будет уделено изучению природы/петрогенезиса и эволюции магматизма, связанного с действием Тихоокеанского суперплюма, оценке количества углекислоты, выделяемого в результате суперплюмовой активности, изотопии кислорода. В рамках этой общей задачи определены следующие цели на второй год реализации проекта: 1) завершение полевых работ; 2) завершение аналитических работ по изучению геохимического и изотопного состава базальтов; 3) проведение аналитических работ по изучению редкоземельного и изотопного состава карбонатов; 4) завершение аналитических работ по изучению состава вкрапленников в базальтах и расплавных включений в них; 5) завершение работ по составлению полной базы геохимических данных, включая результаты, полученные в течение второго года работ; 6) подготовка публикаций в рецензируемых журналах; 7) обновление веб-страницы проекта; 8) участие в научных мероприятиях, в первую очередь, с целью представления новых уникальных данных по составу редких элементов и летучих в расплавных включениях, редкоземельному составу карбонатов и изотопному составу кислорода.

Степень выполнения поставленных в проекте задач:

Задачи, поставленные в проекте и заявленные к исполнению в течение второго года работ по проекту выполнены полностью и даже перевыполнены.

1. В ходе полевых работ 2008-2009 года были отобраны образцы океанических базальтов и ассоциирующих с ними радиоляриевых кремней и карбонатов из аккреционных комплексов (АК) Горного Алтая (Курайский АК, поздний неопротерозой, 140 шт.; Катунский АК, ранний кембрий, 260 шт.), Восточного Казахстана (Чарский АК, поздний девон – 130 шт.), Японии (Акиоши, поздний карбон, 15 шт.; Южный Чичибу, триас, 22 шт.). Всего за 3 полевых сезона было отобрано более 750 образцов пород океанической стратиграфии (ОС) из 9 аккреционных комплексов России, Казахстана, Киргизии и Японии.
2. Для отобранных образцов из Чарского, Акиоши и Чичибу АК был выполнен анализ их состава породообразующих (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , K_2O , Na_2O , P_2O_5), редких (Hf, Ta, Th, U, Sc, Cs, Ba, Y, Zr, Nb, Rb, Sr, Pb) и редкоземельных (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) элементов. Получены дополнительные данные по геохимии радиоактивных изотопов Rb-Sr и Sm-Nd для Засурьинского АК, а также первые изотопные данные по базальтам из Мино-Тамба АК.
3. Отобранные образцы карбонатов были отправлены в Токийский институт технологий, где был изучен их редкоземельный и изотопный состав.
4. Были проведены аналитические работы по изучению состава вкрапленников в базальтах из Катунского, Курайского АК и Чарского АК и расплавных включений в них. Подготовлены образцы для термобарогеохимии из Мино-Тамба АК.
5. Было завершено формирование базы данных по петрохимическому и геохимическому составу палеозойских и мезозойских базальтов из аккреционных зон Горного Алтая, Дальнего Востока, Японии, Монголии и Китая на основе опубликованных и вновь полученных данных. Обзорная статья по 15 АК опубликована в журнале *Gondwana Research* (Safonova et al., 2009). База данных доступна в этой статье в виде электронного файла на [doi:10.1016/j.gr.2009.02.008](https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.02.008)
6. Было подготовлено 8 статей для публикации в рецензируемых журналах; из них четыре уже вышло из печати или уже доступно онлайн (Сафонова, 2008; Сафонова и др., 2008; Safonova, 2009; Safonova et al., 2009), 2 статьи приняты к печати в журнале *Геология и Геофизика*

- (Симонов и др. – расплавные включения; Буслов и др. – плюмовые базальты Центральной Азии), 2 статьи (по Катунскому и Засурьинскому АК) находятся в стадии завершения.
7. Обновлена веб-страница проекта с учетом всех новых данных и публикаций: <http://igc.igm.nsc.ru/images/sotr/safonova/project/rfbr-jsps%20project.htm>
 8. В течение второго года работ по проекту исполнители и руководитель проекта приняли участие в 4 научных мероприятиях, на которых были представлены данные по редкоэлементной и изотопной геохимии базальтов и составу редких элементов и летучих в расплавных включениях Катунского АК, а также по редкоземельному составу карбонатов и изотопному составу кислорода.

Полученные за отчетный период важнейшие результаты:

1. Всего за 3 полевых сезона было отобрано более 750 образцов пород ОС из 9 аккреционных комплексов России (Курайский, Катунский, Засурьинский, Хабаровский и Смагинский АК), Казахстана (Чарский АК), Киргизии (Атбашинский АК) и Японии (Мино-Тамба, Аикоши, Южный Чичибу). Отобрано более 750 образцов пород океанической стратиграфии: базальтов, карбонатов и кремней.
2. Проанализировано 127 образцов базальтов на содержание породообразующих элементов и 77 образцов базальтов на содержание редкоземельных и редких элементов (XRF, ICP MS). Были проанализированы базальты из всех аккреционных комплексов
3. Проанализировано 18 образцов базальтов из Катунского, Засурьинского и Мино-Тамба АК на содержание изотопов Sm-Nd и Rb-Sr.
4. Обработаны все полученные геохимические данные. В результате выявлены базальты плюмового типа (OIB) во всех АК и базальты типа MORB в Катунском, Атбашинском и Чарском АК.
5. Получены данные по составу вкрапленников клинопироксенов и их расплавных включений, включая состав редких элементов и летучих для базальтов Курайского, Катунского, Атбашинского и Чарского АК.
6. Рассчитаны петрологические параметры формирования расплавов по составу пироксена и температурам гомогенизации расплавных включений для базальтов Курайского, Катунского и Атбашинского АК: 1100-1295°C, 1145-1250°C и 1130-1170°C соответственно.
7. Японской стороной проанализированы образцы карбонатов на редкие земли и изотопы кислорода.
8. Изучен микропалеонтологический состав сургучных кремней Улан-Баторского АК (Монголия) и кремней и карбонатов Чарского АК (Восточный Казахстан). Выявленные типы радиолярий и конодонтов показали их ранне- и позднедевонский возраст соответственно.
9. Опубликовано 18 печатных работ, включая 6 статей в рецензируемых журналах. Две статьи принято к печати в журнале Геология и Геофизика, и подготовлено 2 еще статьи, подача которых планируется в журналы Геология и Геофизика (Катунский АК) и Chemical Geology (Засурьинский АК).
10. Подготовлены детальные геологические схемы для Курайского, Катунского АК, Засурьинского, Чарского, Чичибу и Мино-Тамба АК и обобщенные колонки океанической стратиграфии для всех аккреционных комплексов.
11. Проведено микропалеонтологическое и химическое исследование венд-кембрийских карбонатов Курайского АК (Komiyu et al., 2008; Uchio et al., 2008) и микропалеонтологическое изучение радиоляриевых кремней и карбонатов Улан-Баторского и Чарского АК.
12. Обновление базы геохимических данных по аккреционным поясам Центральной Азии, Дальнего Востока и Японии, включая все вновь полученные результаты по Чарскому, Улан-Баторскому, Хабаровскому, Мино-Тамба, Аикоши и Южный Чичибу АК. База данных доступна в этой статье в виде электронного файла на [doi:10.1016/j.gr.2009.02.008](https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.02.008)
13. Участники проекта приняли участие в 9-ти научных конференциях при поддержке фонда.
14. Проведено 2 совместных российско-японских семинара по обсуждению итогов работ по проекту, проблем состава и температур мантии, периодичности континентального роста в связи с плюмовыми процессами и влияние последних на изменения окружающей среды (Новосибирск, июль 2008; Токио – ноябрь 2008).
15. Подготовлена веб-страница по Проекту - <http://igc.igm.nsc.ru/images/sotr/safonova/project/rfbr-jsps%20project.htm>

Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта

(описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны):

I. Полевые работы и отбор образцов

1. Базальты отбирались для анализа их редкоэлементного и изотопного состава и изучения состава вкрапленников в базальтах и расплавных включений в них. Также в распоряжении участников проекта были образцы из Улан-Баторского комплекса, Центральная Монголия, и Смагмнского АК (Восточная Камчатка), любезно предоставленных коллегами из ГИ МАН (академик Томуртоого) и ИВС ДВО РАН (с.н.с. Савельев Д.) соответственно, которые необходимы для проведения корреляций между океаническими образованиями Палео-Азиатского океана (Курайский, Катунский, Засурьинский, Атбашинский, Улан-Баторский и Чарский АК) и Палео-Пацифики (Хабаровский, Тамба-Мино, Акиоши и Чичибу АК).

2. Впервые было проведено детальное опробование известняков «карбонатной шапки» палеоостровов для изучения их редкоэлементного и изотопного состава в Токийском институте технологий. Японская сторона провела анализ карбонатов на содержание редких земель и получила первые результаты по изотопии кислорода.

2007

В июне-ноябре 2007 года были проведены полевые работы на следующих участках:

1. Дальний Восток
 - Хабаровский АК, Приморье, июнь 2007;
2. Горный Алтай
 - Засурьинский АК, СЗ Горный Алтай, июль 2007;
 - Катунский АК, северная часть Горного Алтая, июль-август 2007;
 - Курайский АК, август 2007;
3. Тянь-Шань
 - Атбашинский АК, центральный Тянь Шань, июль 2007;
4. ЮЗ Япония (совместно с японской стороной)
 - аккреционный комплекс Тамба, октябрь 2007;
 - аккреционный комплекс Мино, ноябрь 2007.

2008

В июне-июле 2008 года были проведены полевые работы в Чарском АК Восточного Казахстана (Семипалатинская обл.). Были отобраны образцы базальтов и ассоциирующих с ними пород океанической стратиграфии (известняки, кремни), входящие в состав Чарского офиолитового пояса.

В июле-августе 2008 года были проведены совместные российско-японские полевые работы на Курайском и Катунском АК Горного Алтая для более детального опробования ключевых участков с элементами океанической стратиграфии.

В ноябре 2008 были проведены совместные российско-японские полевые работы на аккреционных комплексах Акиоши (ЮЗ Япония) и Южный Чичибу (ЮЗ Япония). Были отобраны образцы базальтов и ассоциирующих с ними пород океанической стратиграфии (известняки, кремни).

2009

В июне 2009 года проведены дополнительные полевые работы в Чарском АК Восточного Казахстана (Семипалатинская обл.). Были отобраны образцы базальтов именно внутриплитного геохимического типа и ассоциирующих с ними пород океанической стратиграфии (известняки, кремни). Выделено и детально описано/опробовано 2 эталонных объекта ОС с плюмовыми базальтами: николаевский (п. Николаевка/Кентыралау; 49°06'с.ш., 81°59'в.д.) и жангиз-тобинский (п. Жангиз-Тобе; 49°11'с.ш., 81°11'в.д.).

Взаимное положение всех изученных аккреционных комплексов показано на [рис. 1](#).

II. Картирование

Составлены геологические схемы и стратиграфические колонки для Катунского, Засурьинского и Мино-Тамба аккреционных комплексов, показывающие характер и закономерности взаимоотношений базальтов с другими элементами океанической стратиграфии.

На основе детального геологического картирования были впервые составлены схемы масштаба примерно 1:25000 для некоторых ключевых участков, на которых наиболее наглядно реконструируются взаимоотношения вулканических и осадочных пород океанических островов и симаунтов. Было показано структурное положение плюмовых базальтов и ассоциирующих с ними осадков в аккреционных комплексах (в качестве примера см. [рис. 2](#)).

Кроме этого, по оригинальным и литературным данным были построены обобщающие стратиграфические колонки для элементов океанической стратиграфии (ОС) большинства аккреционных комплексов (рис. 3).

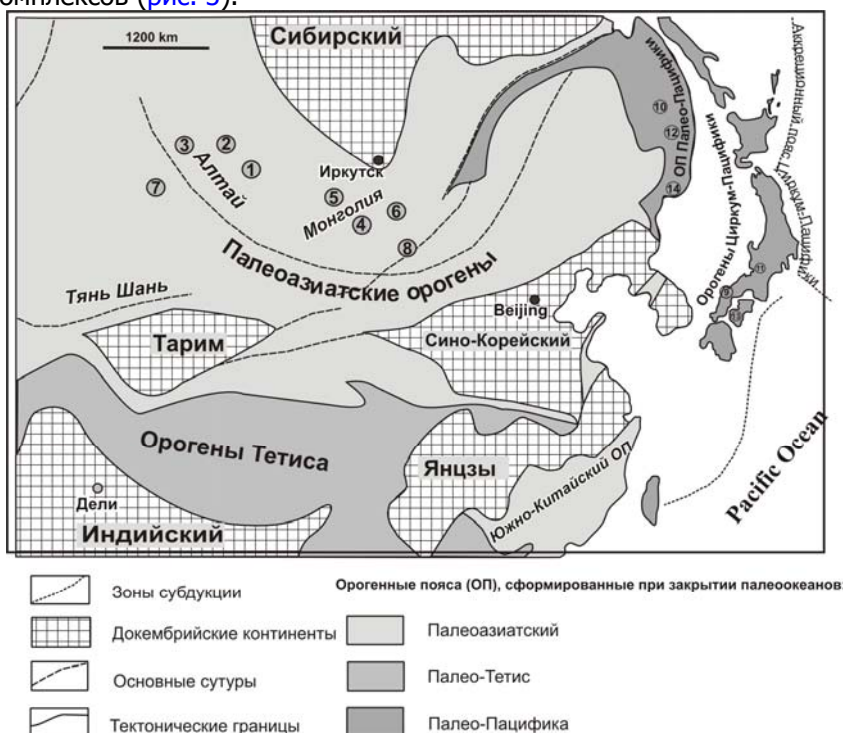


Рис. 1. Тектоническая схема Азии, показывающая основные орогенные пояса и аккреционные комплексы, сформированные при закрытии палеоокеанов (Safonova et al., 2009). В кружках – примерное положение аккреционных комплексов (в порядке уменьшения возраста пород ОС): 1 – Курайский, 2 – Катунский, 3 – Засурьинский, 4 – Баянхонгорский, 5 – Агардагский, 6 – Уланбаторский, 7 – Чарский, 8 – Солонкер, 9 – Акиоши, 10 – Хабаровский, 11 – Мино-Тамба, 12 – Самаркинский, 13 – Чичибу, 14 – Таухинский.

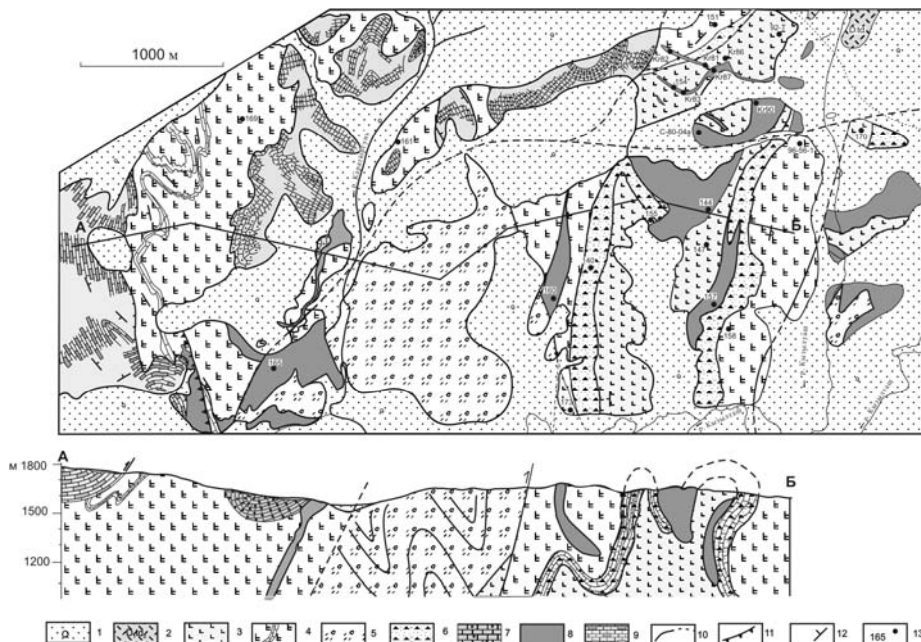


Рис. 2. Детальная геологическая схема участка Курайского АК в бассейне р. Каратюргунь ([Добрецов и др., 2004] с изменениями). 1 – четвертичные отложения; 2 – раннедевонские вулканогенно-осадочные породы; 3 – вендские (?) базальты типа N-MORB; 4-9 – поздневендские комплексы пород Курайского палеосимаунта: 4 – вулканогенная толща с ОРВ и ОІВ и прослоями известняков, 5 – вулканогенно-осадочные породы склоновых фаций, 6 – вулканогенно-карбонатно-кремнисто-конгломератные образования склоновых фаций, 7 – массивные известняки карбонатной шапки, 8 – дайки и силлы Рх-базальтовых порфиритов с характеристиками ОРВ, 9 – докембрийские (?) сероводородные доломиты и известняки; 10 – сдвиги; 11 – надвиги; 12 – элементы залегания слоистости; 13 – место отбора образцов.

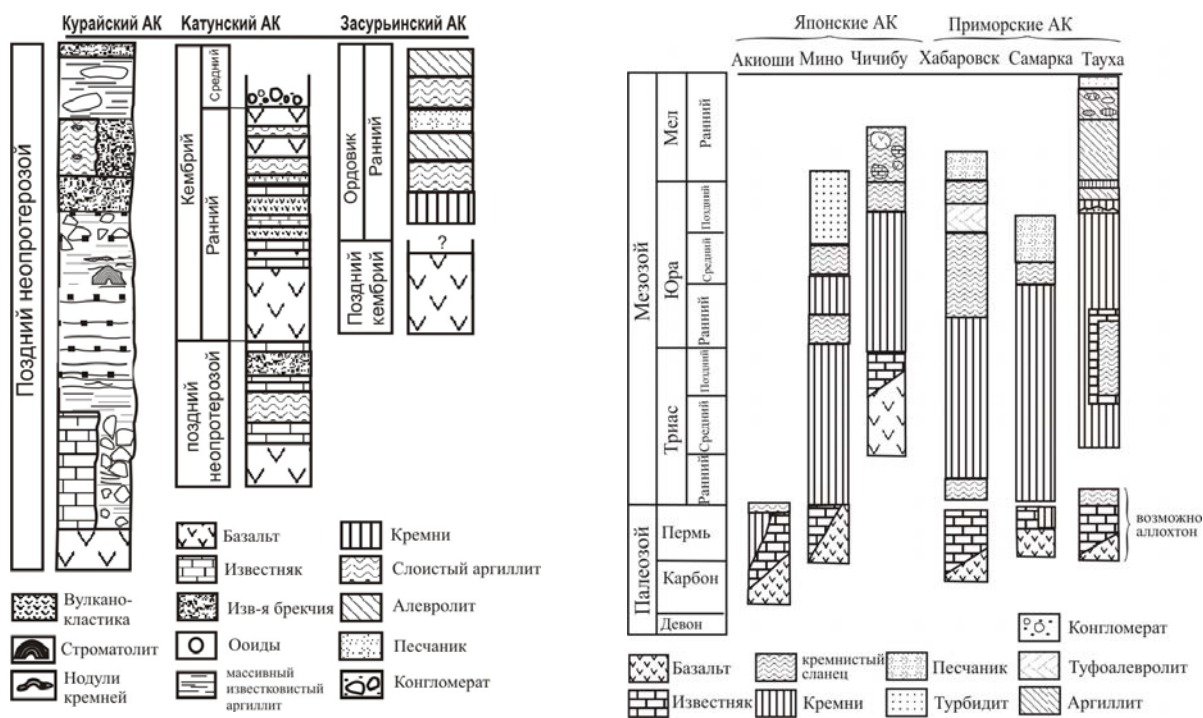


Рис. 3. Схематические колонки океанической стратиграфии, реконструированные для аккреционных комплексов Атлай-Саяна (по данным из Терлеев, 1991; Сенников и др., 2003; Uchio et al., 2004 соответственно; слева) и Приморья/Японии (поданным Isozaki et al., 1990; Isozaki, 1997; Matsuyoka, Yao, 1990; Mizutani, Kojima, 1992; Suzuki et al., 2005; Голозубов и др., 1992; Wakita, Metcalfe, 2005; справа).

III. Геохимические исследования

К настоящему времени уже проанализирован состав породообразующих, редких и редкоземельных элементов для всех образцов базальтов, отобранных в ходе полевых работ 2007 и 2008 годов. Это образцы по Катунскому, Засурынскому, Чарскому, Улан-Баторскому, Мино-Тамба, Самаркинскому, Чичибу, Акиоши и Хабаровскому аккреционным комплексам. Практически для всех объектов такие полные аналитические данные по редкоэлементному составу (29 элементов) и изотопные данные получены впервые. Для базальтов Катунского, Засурынского и Мино-Тамба АК получены первые изотопные данные. Всего получено 127 анализов на породообразующие окислы, 77 анализов на редкие элементы и 18 анализов изотопов Sm-Nd и Rb-Sr. Детальное изучение редкоэлементного и изотопного (ICP-MS, XRF) состава океанических базальтов необходимо для выявления эволюции, типа и состава мантийных источников. Большая часть данных уже вышла из печати или подготовлена к печати. В виде диаграмм геохимические данные представлены на веб-сайте проекта <http://iqc.igim.nsc.ru/images/sotr/safonova/project/rfbr-jsps%20project.htm>.

IV. Петрологические исследования

1. С помощью электронного микроанализатора был проведен анализ породообразующих элементов в клинопироксенах и расплавных включений в них для изучения петрогенезиса базальтов.

2. С помощью минеральных термометров и термобарометров по составу пироксенов (Mercier, 1981; Nimis, Taylor, 2000) были определены температуры кристаллизации расплавов базальтов Катунского АК.

3. С помощью метода термобарогеохимии по температурам гомогенизации расплавных включений были определены физико-химические параметры исходных расплавов внутриплитных базальтов Катунского аккреционного комплекса (ранний кембрий) и Тянь-Шаня (мезозой).

4. С помощью метода SIMS получены первые данные по количеству и составу летучих в исходной магме (вулканической двуокиси углерода и воды).

V. Геохронология

1. Результаты палеонтологического изучения образцов радиоляриевых кремней Улан-Баторского комплекса Центральной Монголии, проведенного японской стороной, показало, что возраст пород ОС соответствует позднему силуру (?) – раннему девону.

2. Результаты палеонтологического изучения образцов радиоляриевых кремней и карбонатов Чарского АК Восточного Казахстана показали средне-позднедевонский возраст пород ОС.

VI. Изучение карбонатов

Японской стороной было проведено микропалеонтологическое (SEM) и химическое (EPMS) исследование поздневендских (эдиакаран) карбонатов Курайского АК Горного Алтая. Микропалеонтологическое изучение карбонатов Курайского палесимаунта с карбонатным атоллом над ним (Uchio et al., 2008) показало наличие в них богатых фосфором микрофоссилий. Это позволило заключить, что на границе эдиакарана и кембрия в мелководных условиях уже обитали разнообразные многоклеточные. Изучение редкоэлементного состава карбонатов показало резкое снижение содержание кислорода в морской воде в позднем эдиакаране, возможно в связи с активным вулканизмом и глобальной регрессией (Komiya et al., 2008).

Степень новизны полученных результатов:

Океанические базальты как древнего возраста (докембрий-палеозой), так и более молодые (мезозой) являются сложными для изучения объектами из-за высокой степени постмагматических изменений (гидротермальный метаморфизм в условиях морского дна, метаморфизм в зонах смятия, поверхностные изменения и т.д.), связанными с подводным характером их излияния и нахождением, как правило, в складчатых поясах, образованных при закрытии палеоокеанов. Детальных геохимических и петрологических работ по таким объектам не так много, поэтому полученные нами новые данные по геохимии и петрологии таких пород имеют большое значение. Особый интерес представляет сделанное выделение критериев идентификации внутриплитных базальтов из сложно построенных аккреционных комплексов на основе всего комплекса геологических, палеонтологических, литологических, геохимических, изотопных и петрологических данных. Только на основе всей совокупности данных можно оценить масштабы излияний и их воздействие на окружающую среду. Также представляется крайне важным отмеченный в Safonova, 2009 перерыв в 100 млн. лет (средний ордовик – средний девон) для плюмового магматизма. Сделано предположение, что либо имело место действительно затухание плюмовой активности в период со среднего ордовика до среднего девона, или базальты типа OIB пока надежно не идентифицированы и могут быть найдены в складчатых структурах Центрального Казахстана и/или Тянь-Шаня, где зафиксированы фрагменты Палео-Азиатского (Yakubchuk, Degtyarev, 1994) или Туркестанского океанов (Биске, Табунс, 1996; Буртман, 2006). Полученные нами первые данные по Уланбаторскому АК из Центральной Монголии (позднесилурийско-раннедевонские породы ОС) и анализ опубликованных данных по Кокшаальскому АК Южного Тянь-Шаня (Биске, Табунс, 1996) показали, что, скорее всего, мы имеем дело с недостаточной изученностью складчатых областей, содержащих фрагменты среднепалеозойской ОС. Сложность идентификации таких объектов обсуждается в Safonova et al., 2009.

Особое значение имеет выполненное японской стороной микропалеонтологическое и геохимическое изучение карбонатов эдиакаранского возраста, которое позволило определить содержание кислорода в морской воде на то время и выявить наличие в карбонатах Курайского АК многоклеточных организмов.

ГЕОХИМИЯ БАЗАЛЬТОВ

(в порядке убывания возраста)

Исследования геохимии океанических базальтов Палео-Азиатского океана, Палео-Тетиса и Палео-Пацифики ограничены публикациями по Джидинской зоне Забайкалья (Гордиенко и др., 2007), Горному Алтаю (Buslov et al., 2001; Safonova et al., 2004, 2008; Сафонова, 2008), Дальнему Востоку (Ханчук и др., 1989; Войнова и др., 1994), Монголии (Tomurhoo, Munkh-Erdene, 2006; Helo et al., 2006) и Китая (Zhang et al., 1995; Yang et al., 1999; Mattern, Schneider, 2000; Feng, 2002; Xiao et al., 2007; Miao et al., 2007). Уровень детальности проведенных исследований сильно различается. В большинстве работ представлен весьма ограниченный набор редких элементов, не позволяющий провести корректную интерпретацию геохимических данных и надежно обосновать происхождение базальтовых магм. Изотопные же характеристики представлены в вышеперечисленных работах еще более ограниченно: только в (Сафонова, 2008; Xiao et al., 2007; Miao et al., 2007).

Поэтому полученные нами новые геохимические данные по редкоэлементному и изотопному составу базальтов, а также данные по температурам гомогенизации и составу расплавных включений, являются пионерными и позволили полностью выполнить все задачи, поставленные в проекте. Первые предварительные данные по содержанию летучих компонентов (вода, углекислота) в расплавных включениях позволят оценить объем выделившейся углекислоты. Эти результаты

являются уникальными, первыми данными такого рода, полученными именно по древним базальтам. Сейчас эти данные готовятся к печати.

Геохимическая характеристика базальтов Курайского АК, Горный Алтай *(поздний неопротерозой)*

На Горном Алтае океанические базальты широко развиты в пределах аккреционной призмы Кузнецко-Алтайской островной дуги, включая Курайскую зону, расположенную в его юго-восточной части.

Базальты Палеоазиатского океана, которые в настоящее время представляют собой тектонические фрагменты в составе Курайского АК, представлены деплетированными, переходными и обогащенными Ti, Nb и LREE разновидностями. Деплетированные - схожи по составу с N-MORB и ассоциируют с тонкослоистыми кремнистыми отложениями. Переходные и обогащенные - близки к внутриплитным базальтам Тихого океана и ассоциируют с карбонатно-кремнистыми отложениями склоновых фаций и известняками карбонатной "шапки" океанических поднятий.

Геохимические характеристики пород свидетельствуют, что базальты типа N-MORB формировались из деплетированного верхнемантийного источника (DMM), а переходные и обогащенные базальты – из гетерогенного мантийного источника, включающего компоненты DMM и RSC (рециклированного океанического слэба).

Базальты формировались в геодинамических обстановках срединно-океанических хребтов, океанических островов и плато. Тесная связь базальтов плюмового происхождения с базальтами срединно-океанических хребтов предполагает существование в вендское время в Палеоазиатском океане океанических островов и плато. Полученные результаты подтверждают, что Палеоазиатский океан развивался по аналогии с Тихим океаном, т.е. в нем действовали горячие точки типа гавайской и мантийные плюмы, приведшие к образованию базальтовых плато типа Онтонг-Джава. Состав базальтов Курайского АК детально обсуждается в работах: Сафонова, 2008; Сафонова и др., 2008.

Геохимическая характеристика базальтов Катунского АК, Горный Алтай *(ранний кембрий)*

Катунская зона расположена в северной части Горного Алтая, который является западным сегментом Алтае-Саянской складчатой области, и включает в себя вулканогенные и осадочные образования вендской островной дуги, преддугового прогиба, а также аккреционного комплекса Кузнецко-Алтайской островной дуги, сформированной на окраине Сибирского континента в результате ранне-среднекембрийской субдукции коры Палео-Азиатского океана (Buslov et al., 2001). Вулканогенно-осадочные толщи Катунской зоны, включающие базальты, изучались многими исследователями. Но до сих пор детального изучения геохимического состава базальтов не проводилось. В опубликованных работах обсуждается либо только состав породообразующих элементов, либо данные по геохимии редких элементов представлены в ограниченном количестве (Buslov et al., 1993; Гибшер и др., 1997; Добрецов и др., 2004; Зыбин, 2006 и др.).

В геологической структуре Катунского аккреционного комплекса раннекембрийские базальты манжерокской свиты ассоциируют с массивными известняками «карбонатной шапки» палеоострова и кремнисто-карбонатными брекчированными отложениями склоновых фаций. Для них характерно обогащение титаном ($TiO_{2cp.}=2,82$ мас.%), LREE ($La/Sm_n=1,20-3,65$) и ниобием ($Nb/La_{pm}>1$). Это предполагает участие в источнике обогащенного Nb плюмового компонента и кристаллизацию расплава на уровне шпинелевой ($Gd/Yb_n=1,65-1,82$) и гранатовой ($Gd/Yb_n=2,1-4,24$) фаций, т.е. формирование базальтов манжерокской свиты в обстановке океанического острова в связи с активностью горячей точки Палео-Азиатского океана.

Раннекембрийские базальты эсконгинской свиты также относятся к аккреционной структуре и ассоциируют с пелагическими, тонкотерригенными осадками и кремнисто-терригенно-карбонатными отложениями склоновых фаций. Базальты имеют средние содержания титана ($TiO_{2cp.}=0,97$), плоские спектры распределения REE ($La/Sm_n=1,07-1,28$), Nb минимум по отношению к La и Th ($Nb/La_{pmcp.}=0,47$; $Nb/Th_{pmcp.}=0,46$), но при этом, в отличие от надсубдукционных базальтов, для них не характерны повышенные содержания Th, т.е. $La/Nb_{pm}>Th/Nb_{pm}$.

Невысокие отношения Gd/Yb_n ($Gd/Yb_{ncp.}=1,3$) предполагают степень плавления мантийного источника на уровне шпинелевой фации. По совокупности геологических и геохимических данных мы предполагаем, что они образовались в обстановке океанического дна (срединно-океанического хребта) и расположены в основании палеоострова. Среднекембрийские базальты усть-семиинской свиты в геологической структуре Катунской зоны секут (дайки) и перекрывают (лавы) раннекембрийские отложения аккреционного клина.

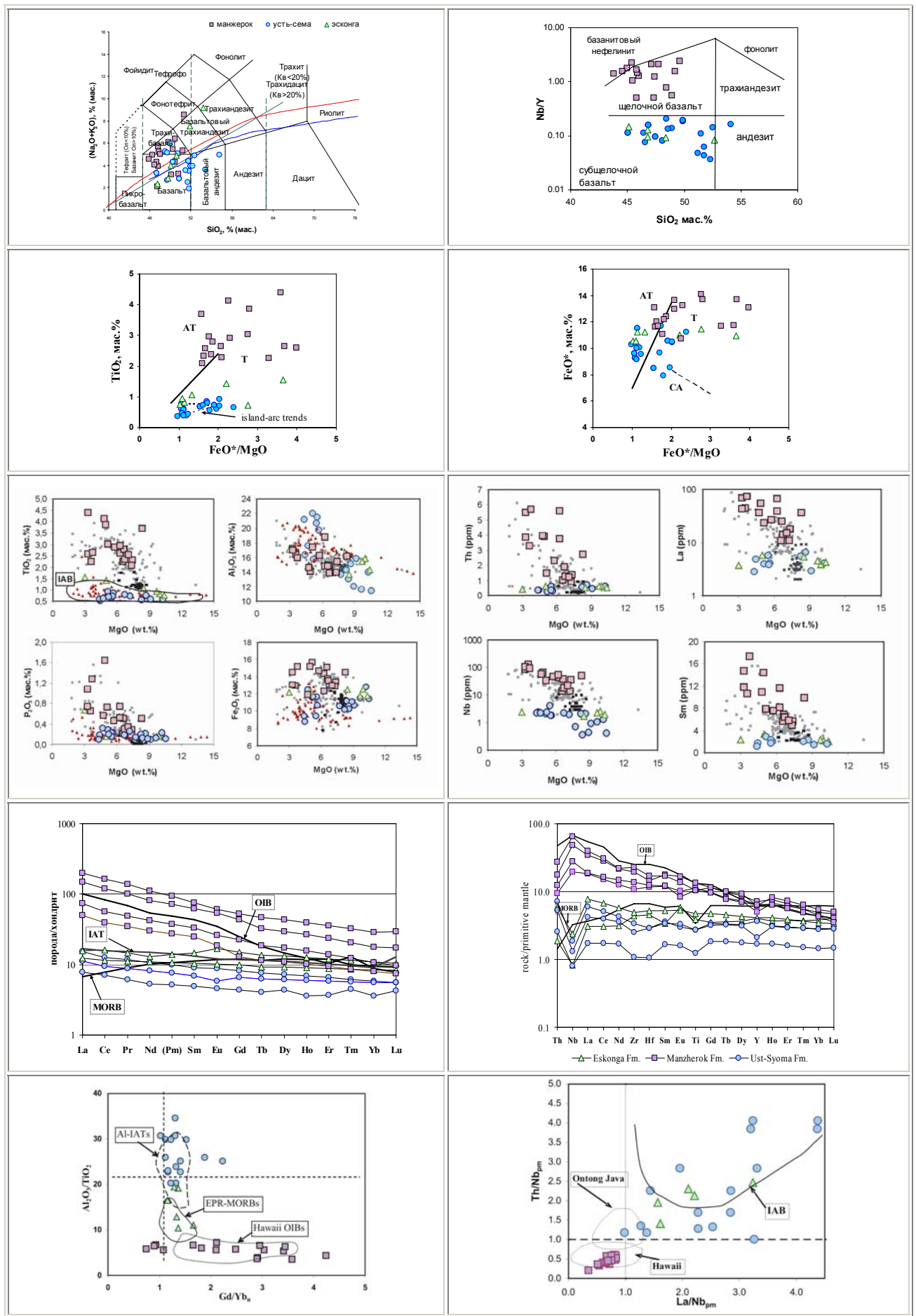


Рис. 4. Результаты геохимических исследований базальтов OIB-типа Катунского АК.

По составу они представлены высокомагнезиальной и низкомагнезиальной группами. Для базальтов характерно низкое содержание TiO_2 ($\text{TiO}_{2\text{ср.}}=0,67$ мас.%), плоские спектры редкоземельных элементов ($\text{La}/\text{Sm}_n=1,03-1,73$) и более выраженные отрицательные аномалии Nb по отношению к Th ($\text{Nb}/\text{La}_{\text{рм.ср.}}=0,47$; $\text{Nb}/\text{Th}_{\text{рм.ср.}}=0,58$). Степень плавления мантийного источника предполагается на уровне шпинелевой фации ($\text{Gd}/\text{Yb}_{\text{ср.}}=1,41$). Основываясь на геологических сведениях и геохимических характеристиках, можно сделать предположение об их образовании в надсубдукционной обстановке (рис. 4).

Геохимия базальтов Катунского АК детально обсуждается в работах: Сафонова, 2008; Симонов и др. (в печати). Подготовлена отдельная статья по Катунскому АК.

Геохимическая характеристика базальтов Засурьинского АК, СЗ Алтай *(поздний кембрий)*

Океанические базальты засурьинской свиты были обнаружены в аккреционном комплексе Чарыш-Теректинской сдвиговой зоне, имеющей ЗСЗ простирание, в северо-западной части Горного Алтая. Чарыш-Теректинская зона маркирует среднедевонскую коллизионную зону между Алтае-Монгольским террейном и Сибирским континентом. Базальты Засурьинского АК представлены 3-мя типами: La-Nb деплетированные, переходные и обогащенные. Во всех разностях Mg# варьирует от 56 до 20 при достаточно узком разбросе SiO_2 (46-52 wt%). Железо, Zr, Nb, Y, LREE Ti, Cr, Ni и Th снижаются при снижении Mg# в разной степени. Деплетированные толеиты характеризуются слабо истощенными LREE ($\text{La}/\text{Sm}_n=0.6-1.0$), слабо фракционированными HREE ($\text{Gd}/\text{Yb}_n=1.1-1.3$) и отрицательными аномалиями по Nb и Th относительно La ($\text{Nb}/\text{La}_{\text{рм.}}=0.37-0.8$, $\text{Th}/\text{La}_{\text{рм.}}=0.4-0.85$). Переходные базальты имеют умеренно фракционированные REE ($\text{La}/\text{Sm}_n=1.6-2.0$, $\text{Gd}/\text{Yb}_n=1.3-2.4$) и положительные аномалии по Nb и отрицательные по Th относительно La ($\text{Nb}/\text{La}_{\text{рм.}}=1.2-1.6$, $\text{Th}/\text{La}_{\text{рм.}}=0.7-0.9$). Преобладают обогащенные базальты с повышенными LREE и фракционированными HREE ($\text{La}/\text{Sm}_n=1.9-4.7$, $\text{Gd}/\text{Yb}_n=1.5-2.5$), положительными аномалиями по Nb и нулевыми и положительными аномалиями по Th ($\text{Nb}/\text{La}_{\text{рм.}}=1.0-1.8$, $\text{Th}/\text{La}_{\text{рм.}}=0.6-1.15$). Скорее всего, эти аномалии являются результатом рециклинга материала океанической литосферы в мантию, а не результат мантийного плавления, коровой контаминации или фракционной кристаллизации. На состав породообразующих элементов оказали влияние процессы постмагматических изменений и метаморфизма. Обогащенные базальты характеризуются более высокой степенью фракционирования REE ($\text{La}/\text{Yb}_n=6-9$) и более выраженными положительными аномалиями по Nb, как и фанерозойские базальты океанических островов типа HIMU, чем переходные ($\text{La}/\text{Yb}_n=3-4$) (рис. 5). И обогащенные и переходные базальты имеют более высокие отношения Zr/Hf, чем деплетированные. Деплетированные базальты мы интерпретируем, как образованные в условиях океанического спрединга и представляющие собой основание океанического острова, тогда как переходные и обогащенные – как цепочку океанических поднятий, сформированную в результате действия гетерогенного мантийного плюма (горячей точки), прожигающего движущуюся океаническую литосферу. Похожие кривые распределения редких элементов характерны для многих фанерозойских переходных и щелочных базальтов океанических островов Тихого океана и протерозойских и архейских вулканических пород, которые интерпретируется, как OIB (Chen et al., 1991; Weaver, 1991; Stern et al., 1995; Polat et al., 1999). В последних наблюдаются и отрицательные, и положительные аномалии Zr (Hf) на мульти-компонентных диаграммах ($\text{Zr}/\text{Zr}^*=0.43-1.26$), что предполагает плавление мантии на уровне шпинелевой до гранатовой фации, т.е. ниже и выше 400 км. Деплетированные же базальты образовались в верхней мантии еще при меньших глубинах. Океанические острова вошли в состав аккреционных комплексов в виде тектонических пластин, смешанных с фрагментами подстилающего океанической коры с базальтами типа MORB.

Состав базальтов Засурьинского АК кратко обсуждается в Safonova, 2009 и Safonova et al., 2009. Подготовлена подробная статья по геохимии, изотопии и петрологии этих базальтов в Chemical Geology.

Геохимическая характеристика базальтов Атбашинского АК, Центральный Тянь-Шань *(средний ордовик)*

Получены первые данные по полному набору породообразующих и редких (в том числе и редкоземельных) элементов океанических базальтов южной части Палео-Азиатского или Туркестанского по Буртману (2006) океана из аккреционного комплекса Атбаши южного Тянь-Шаня, включающего девонские (Биске, Табунс, 1991) и/или ордовикские (Куренков, Аристов, 1995) основные вулканисты.

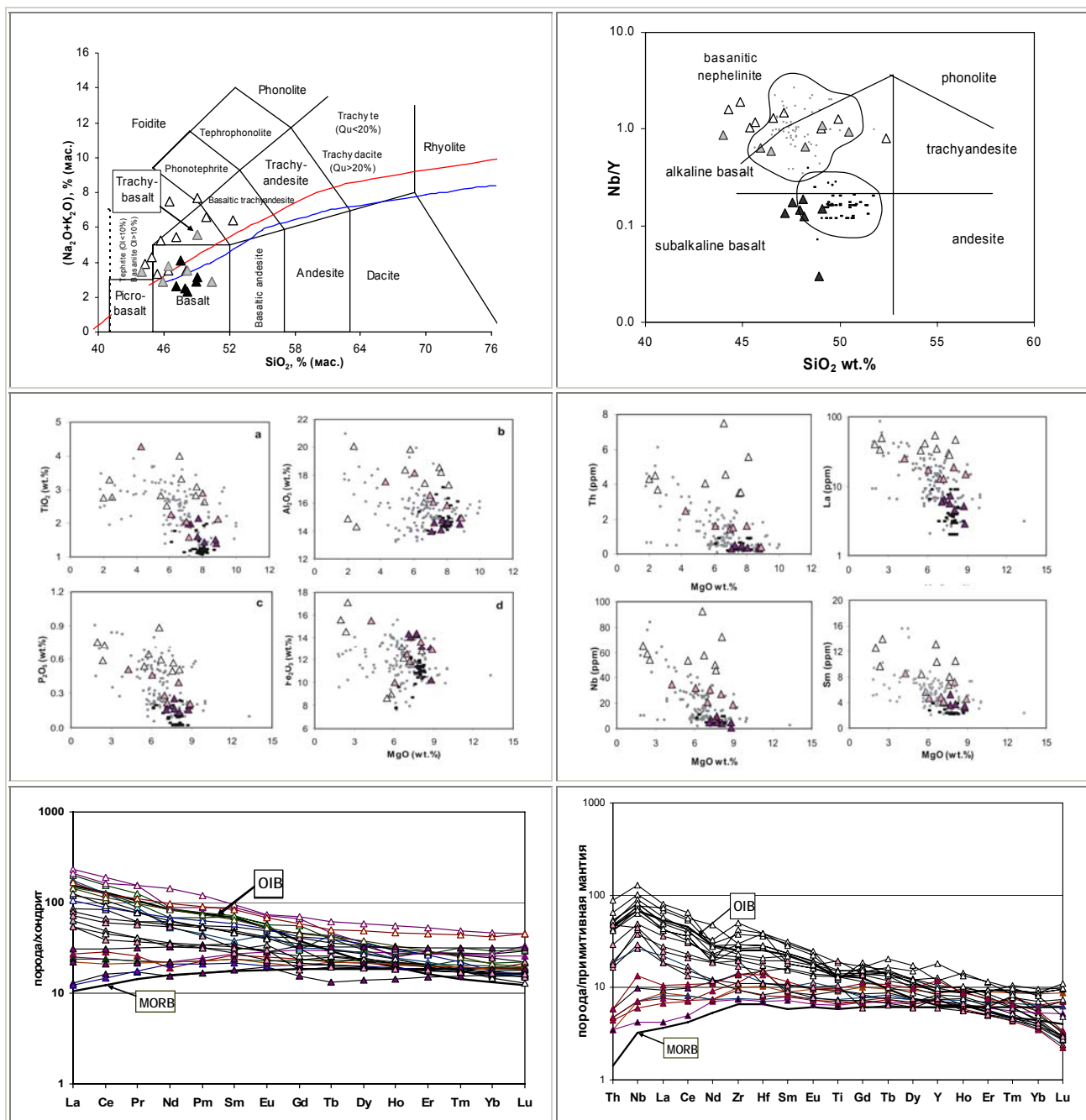


Рис. 5. Результаты геохимических исследований базальтов OIB-типа Засуринского АК.

В нашем распоряжении были образцы базальтов, которые по соотношению кремнекислоты и щелочей породы представляют собой базальты нормального ряда абиссальной серии (Miyashiro, 1973). С точки зрения редкоземельного состава они характеризуются плоскими и деплетированными в области LREE спектрами распределения редкоземельных элементов. Мульти-компонентные спектры, нормированные по примитивной мантии, не обнаруживают положительных аномалий по Nb. В целом, геохимические характеристики базальтов Атбаши предполагают, что они образовались скорее в условиях океанического спрединга, а не в связи с активностью горячей точки. Полученные данные подтверждают существование океанического пространства между Казахстанским континентом и Таримским блоком в силуре-ордовике, но не подтверждают плюмовый магматизм в этот период времени (рис. 8). По данным Биске (личные коммуникации) базальты внутриплитного типа встречаются в ранне-среднедевонских отложениях Кокшаальского АК Южного Тянь Шаня. Анализ имеющихся образцов из этого комплекса и полевые работы на Кокшаале будут проводится в рамках будущего проекта.

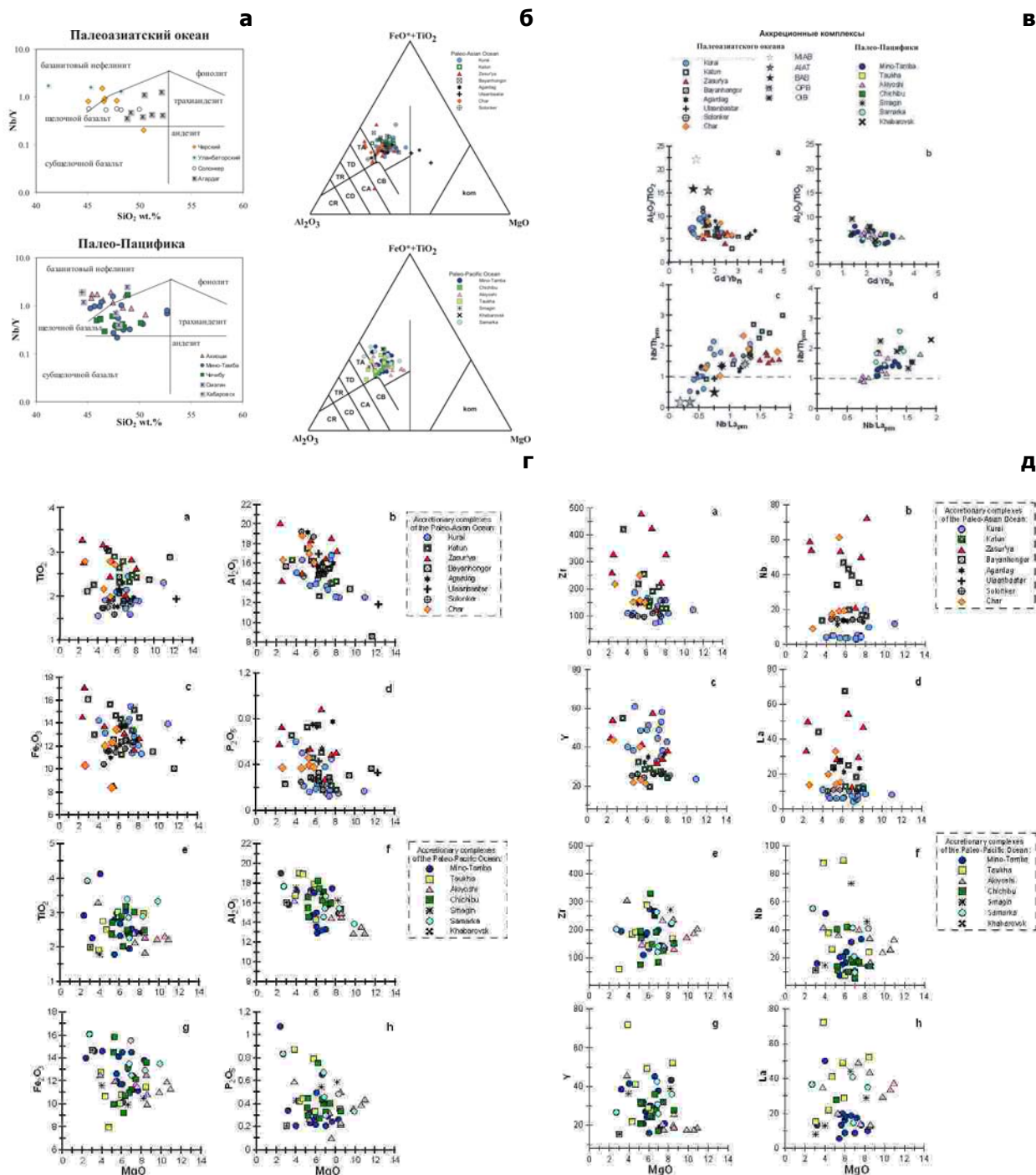


Рис. 6. Геохимическая характеристика внутриплитных базальтов типа OIB из аккреционных комплексов Палеоазиатского океана (Paleo-Asian Ocean) и Палео-Пацифики (Paleo-Pacific Ocean): а, б – классификационные диаграммы: Nb/Y - SiO₂ (Winchester and Floyd, 1977; а), Al₂O₃ – FeO*+TiO₂ – MgO (Jensen, 1976; б); в-г – бивариантные диаграммы: Al₂O₃/TiO₂ - Gd/Yb_n, Nb/La_{pm} - Nb/Th_{pm} (в), MgO – породообразующие окислы (г), MgO – редкие элементы (д).

Геохимическая характеристика базальтов Уланбаторского АК, Центральная Монголия (ранний девон)

Впервые были получены данные по составу породообразующих и редких элементов океанических базальтов из Уланбаторского аккреционного комплекса. По составу породообразующих элементов базальты представляют собой высокотитанистые лавы, схожие по составу с щелочными базальтами Гавайских островов. Для базальтов Уланбаторского АК характерны высокие LREE (La/Sm_n= 2,5-2,9; La/Yb_n=12-15) и достаточно высокая степень дифференциации HREE (Gd/Yb_n=3,5-4,4), высокие концентрации Nb (Nb/La_{pm}=1,1-1,3; Nb/Th_{pm}=1,2-1,3; (рис. 6, 7). Базальты с внутриплитными характеристиками позднепротерозойского возраста ранее были описаны в Джидинском комплексе, имеющим свое продолжение на территории России (Гордиенко и др., 2007).

Данных о среднепалеозойских базальтах плюмового типа в Монголии пока не было опубликовано. Поэтому проанализированные нами базальты из Улан-Баторского АК надежно идентифицированы в Монголии впервые (Safonova et al., 2009). Нами был подтвержден ранее предполагаемый раннедевонский возраст этих базальтов. Таким образом, внутриплитные базальты этого возраста – это первые из когда-либо описанных в литературе базальты OIB типа из «немного» интервала средний ордовик - средний девон (Safonova, 2009).

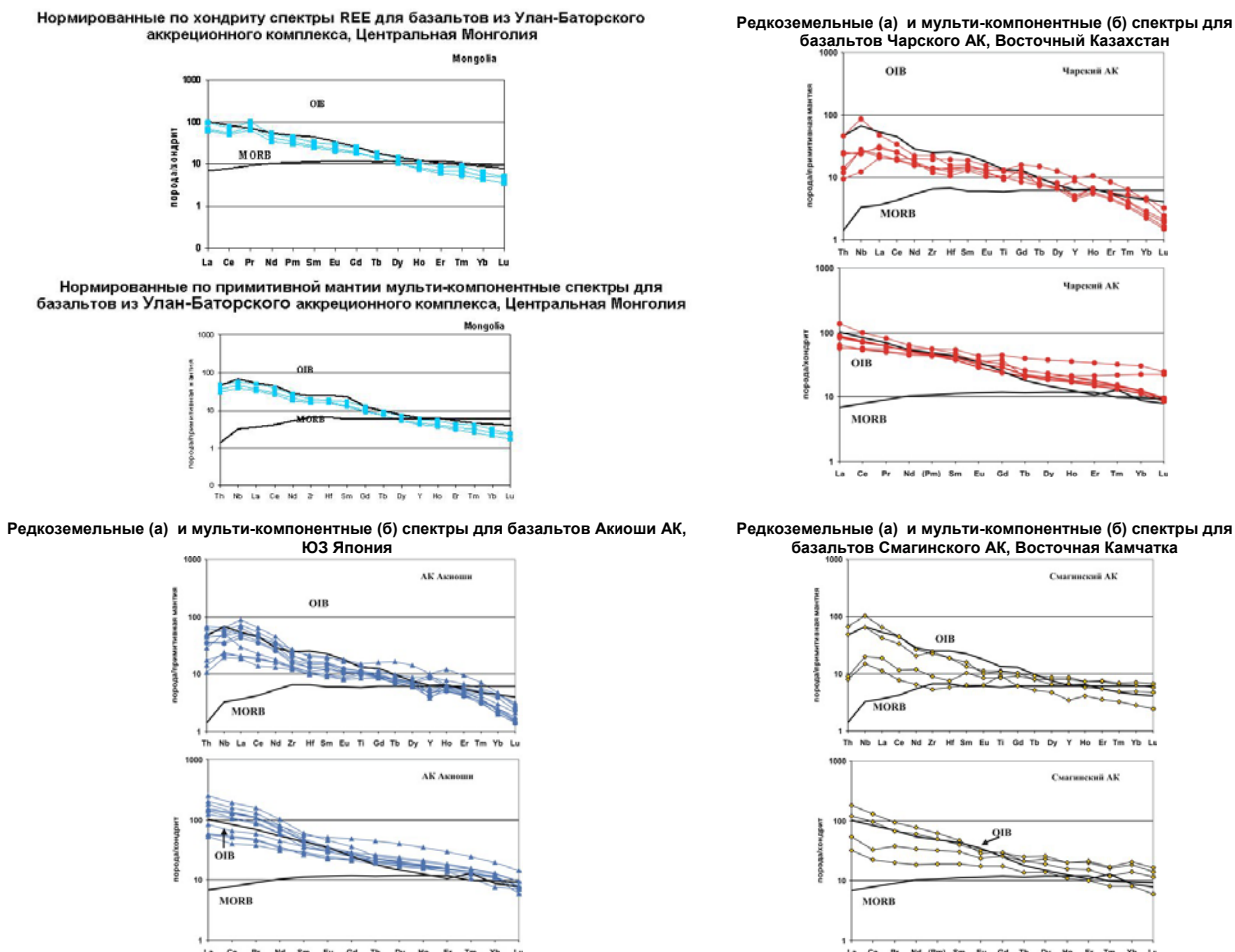


Рис. 7. Редкоэлементный состав внутриплитных базальтов из аккреционных комплексов Монголии, Восточного Казахстана, Японии Камчатки.

Геохимическая характеристика базальтов Чарского АК, Восточный Казахстан (поздний девон)

В Чарском АК в ассоциации с позднедевонскими океаническими осадочными породами присутствуют два типа базальтов: обогащенные LREE, Nb и Ti базальты океанического острова (типа OIB или внутриплитные/плюмовые) и базальты океанического дна (типа N-MORB) со средним содержанием TiO_2 . Базальты типа OIB характеризуются обогащенными LREE кривыми распределения редкоземельных элементов (REE) с заметными вариациями La/Sm_N (1,06-2,97, $Gd/Yb_N = 1,47-2,74$). Относительно средних PЗЭ имеются небольшие отрицательные аномалии по Zr и Hf. Базальты типа MORB слегка истощены LREE и характеризуются плоскими участками тяжелых PЗЭ ($La/Sm_N = 0,51-0,83$, $Gd/Yb_N = 1,12-1,17$), а также Nb минимумами ($Nb/La_N = 0,46-0,72$). Базальты океанического острова слегка обеднены железом по отношению к базальтам океанического дна ($Fe_2O_3 = 7,8-13$ vs. $11,5-15,2$ масс.%). В них Mg# варьирует от 36 до 58 при относительно узком разбросе содержаний SiO_2 (45-52 масс.%). Характерны отрицательные Th аномалии по отношению к La ($Th/La_N = 0,4-0,9$) при преимущественно положительных Nb аномалиях ($Nb/La_N = 1,0-2,17$). По соотношениям $La/Sm - Lu/Hf$ и $Ce/Nb - Th/Nb$ обогащенные базальты выплавлялись на уровне глубин между шпинелевой и гранатовой фациями из гетерогенного мантийного источника, образованного при смешении компонентов DMM и RSC. Характеристика состава внутриплитных базальтов Чарского АК показана на рис. 6, 7). По геологическим и геохимическим критериям базальты изливались в геодинамических

обстановках срединно-океанических хребтов и океанических островов. Позднедевонская кора Палеоазиатского океана была сформирована по аналогии с корой западной части Тихого океана.

Геохимическая характеристика базальтов Хабаровского АК, Приморье

(карбон)

Впервые были получены данные по полному набору редких элементов, а также и породообразующих, для предположительно позднекарбонных-раннепермских (Suzuki et al., 2005) океанических базальтов из Хабаровского аккреционного комплекса. Высказанное ранее предположение о формировании ассоциирующих карбонатов и кремней в условиях океанического поднятия подтвердилось полученными нами данными по геохимии базальтов (к сожалению, пока в весьма ограниченном количестве). Базальты – высокотитанистые, нормального и щелочного ряда, обогащены легкими редкими землями, ниобием и торием. По совокупности выделенных нами геологических и геохимических критериев они полностью соответствуют плюмовым базальтам, образованными в условиях океанического острова. В будущем предполагается подтвердить или опровергнуть предположение о генетической связи базальтов Хабаровского комплекса с базальтами комплекса Акиоши ЮЗ Японии (Safonova, 2009; Safonova et al., 2009; рис. 6, 8).

Геохимическая характеристика базальтов Акиоши АК, ЮЗ Японии

(средний карбон)

Базальты Акиоши представлены щелочными разностями (рис. 6а). Средние MgO (6–10 масс.%) и Fe₂O₃ (10–12 масс.%) дают Mg# от 40 до 60 (рис. 6г). На графиках TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ и P₂O₅ - MgO точки составов не образуют четких трендов или компактных полей (рис. 6г). Содержания TiO₂ варьируют от 1,8 до 3,0 масс.%, в P₂O₅ – от 0,2 до 0,6 масс.%, при это P₂O₅ растет при снижении MgO. Незначительный рост TiO₂ и Fe₂O₃(tot) при снижении MgO предполагает отсутствие заметного фракционирования окислов Fe-Ti. SiO₂ = 45-50 масс.%; Al₂O₃ меняется от 12 до 16 масс.% и обычно растет при снижении MgO, что предполагает одновременное фракционирование клинопироксена и плагиоклаза (рис. 6г). Концентрации Ni и Cr составляют в среднем 150 и 380 г/т соответственно. Некоторые образцы имеют повышенные Ni и Cr, что предполагает относительно примитивный состав исходной магмы. Положительные корреляции между MgO и Ni (Cr) контролируются фракционированием оливина и пироксена, а снижение Ni при снижении MgO предполагает раннюю кристаллизацию/отделение оливина. Концентрации Nb (3–130 г/т), Y (16–70 г/т) и Zr (60–480 г/т) растут при снижении MgO, что вполне ожидаемо при фракционировании плагиоклаза, оливина и клинопироксена (рис. 6д). Большинство образцов имеет отношения Zr/Nb ratios от 6 до 9, как и во многих базальтах Императорско-Гавайской цепи симаунтов (Regelous et al., 2003). Широко варьирующие отношения Ti/Zr (65-100) предполагают различные условия плавления, контролируемые либо составом мантийного источника, либо степенью частичного плавления, либо фракционированием титаномагнетита. Базальты Акиоши имеют обогащенные LREE редкоземельные спектры: La_N=57-250, La/Sm_N=1.8-4.0, Gd/Yb_N=1,8-2,8 (рис. 7). На большинстве мульти-компонентных спектров имеются положительные аномалии по Nb относительно La и Th (Nb/La_{pm}=0.7-1.2; Nb/Th_{pm}=0.9-1.8; рис. 7).

Геохимическая характеристика базальтов Мино-Тамба АК, Центральная Япония

(средняя-поздняя пермь)

Океанические базальты, входящие в состав аккреционного пояса Тамба-Мино, изучались многими исследователями, однако, детального изучения их редкоэлементного состава, подразумевающего полный набор редкоземельных и редких элементов, не проводилось. Ранее было установлено, что вулканы представлены как спрединговыми (MORB), так и плюмовыми (OIB) разновидностями. В нашу задачу входил отбор образцов разного возраста, например, ранняя пермь - средняя пермь – поздняя пермь для комплекса Тамба-Мино и ранний карбон - поздний карбон - ранняя пермь для комплекса Акиоши, для их последующего анализа на полный набор породообразующих, редких элементов и Sm-Nd, Rb-Sr и U—Pb изотопов. В 2007 году были отобраны базальты ранне- и среднепермского возраста пояса Тамба-Мино. Предварительные данные показали, что тенденция отмеченная для Императорско-Гавайской цепи симаунтов и подтвержденная для неопротерозойско-ранне-среднекембрийских базальтов Палеоазиатского океана, отмечается и для базальтов цепи симаунтов Акасака-Куцуу Палео-Пацифики (Safonova, 2009; Safonova et al., 2009; рис. 6, 8).

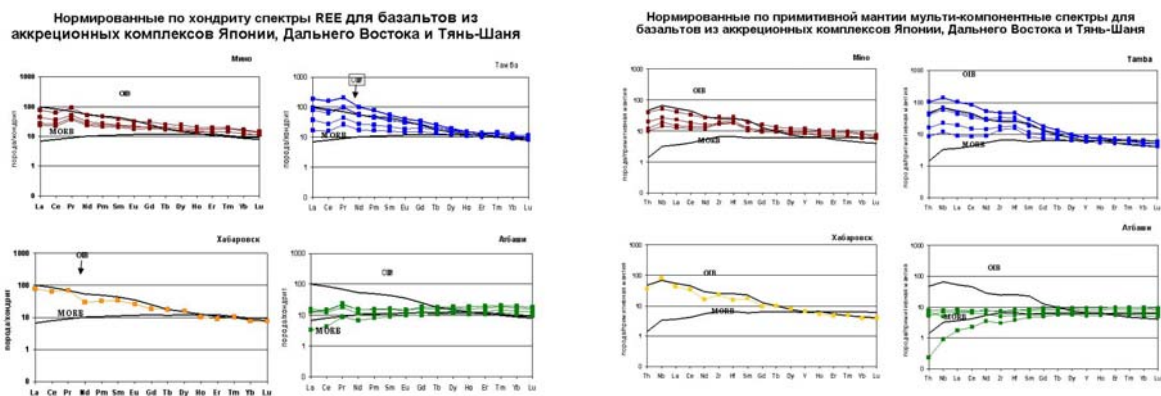


Рис. 8. Редкоэлементный состав внутриплитных базальтов из аккреционных комплексов Японии, Приморья и Тянь-Шаня.

Геохимическая характеристика базальтов Смагинского АК, восточная Камчатка (мел)

Содержания SiO_2 составляют 47-50,3%, TiO_2 – 1,7-2,5%, K_2O – 1,2-4,5%, P_2O_5 – 0,51-0,83%. Калиевый характер щелочности определяется преобладанием калия над натрием ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1,07-1,71$). По химическому составу породы являются щелочными базальтами (рис. 6а). Базальты характеризуются высокой глиноземистостью (16,3-18,8% Al_2O_3) и низкой железистостью (8,7-10,7% суммарного FeO). По содержанию микроэлементов базальты характеризуются относительно низкими содержаниями Rb, Ba и Sr и высокими Cr и Ni. Распределение РЗЭ у всех базальтов имеет сильно фракционированный характер (рис. 7), соответствуя таковому во внутриплитных базальтах (OIB), $\text{La}_N/\text{Sm}_N = 3,1-5,2$, $\text{Zr}/\text{Y} = 7,2-10$. Анализ геодинамических диаграмм, использующих стабильные при вторичных изменениях элементы ($\text{Hf}/3\text{-Th-Ta}$ и $\text{Hf}/3\text{-Th-Nb}/16$), также показывает принадлежность этих пород к группе базальтов океанических островов. Этот же вывод следует из высокого отношения Ti/V , равного 51-90. Наличие четких положительных пиков по Nb относительно La и Th соответствует таковому во внутриплитных базальтах (OIB): $\text{Nb}/\text{La}_{\text{pm}} = 1.1-1.3$; $\text{Nb}/\text{Th}_{\text{pm}} = 1.9-2.2$ (рис. 7).

Вариации химического состава внутриплитного магматизма

Нами получены первые результаты эволюции химического состава от поздне-неопротерозойских базальтов Курайского, через раннекембрийские базальты Катунского до позднекембрийских базальтов Засурьинского палеоостровов, фрагменты которых встречаются в каледонских аккреционных комплексах Горного Алтая (рис. 1). Наши исследования показали, что редкоэлементные составы лав более древнего Курайского палеоострова (600 млн. лет) и более молодых Катунского и Засурьинского палеоостровов (550 и 500 млн. лет) существенно различаются друг от друга (Сафонова, 2007, 2008). Более древние Курайские базальты содержат меньше TiO_2 , LREE и более магнезиальны; для них характерны более низкие индикаторные отношения несовместимых элементов ($\text{Nb}/\text{La}_{\text{pm}}$, $\text{Nb}/\text{Th}_{\text{pm}}$, Gd/Yb_N), близкие к таковым для самых древних базальтов Императорско-Гавайской цепи симаунтов (85-81 млн. лет) и базальтам плато Онтонг-Джава [Neal et al., 1997; Regelous et al., 2003]. Для более молодых Катунских базальтов характерны более высокие TiO_2 и LREE и более низкие #Mg. Засурьинские базальты имеют еще более высокие концентрации TiO_2 и LREE и самые низкие #Mg. Обогащенные некогерентными элементами Катунские и засурьинские базальты можно отнести к внутриплитным сериям океанических островов, таких как самые молодые базальты ИГЦ (<42 млн. лет), Гавайские толеиты (< 2 млн. лет) и островов ЮЗ Пацифики [García et al., 1986; Némond et al., 1994; Regelous et al., 2003].

Предположим, что базальты Курайского и Катунского палеосимаунтов и засурьинской свиты выплавились в результате действия однотипной горячей точки или мантийного плюма типа Гавайского. Разница в возрасте между ними примерно 100 млн. лет, т.е. близкая к разнице между самыми древними базальтами ИГЦ и Гавайскими вулканами (80-85 млн. лет) [Regelous, Hofmann, 1999]. Логично предположить, что с эдиакарана до середины кембрия мощность океанической литосферы значительно возрасла. Условия частичного плавления тоже изменились, что привело к заметному различию между степенями обогащения некогерентными элементами курайских и катунских базальтов. К концу кембрия-началу ордовика мощность коры еще увеличилась, но не в такой степени, т.к. начиная с 50 млн. лет, скорость роста мощности океанической коры снижается

[Sclater, Tapscott, 1979]. Поэтому условия для частичного плавления в мантии мало изменились, и различие по степени обогащения некогерентными элементами между катунскими и засурьинскими базальтами оказалось не так велико. Таким образом, мы полагаем, что различие соотношений в системах Nb-Th-LREE и MREE-HREE между курайскими базальтами (600 млн. лет) с одной стороны и Катунскими (550 млн. лет) и засурьинскими (490 млн. лет) связано с разной глубиной мантийного плавления и разной степенью частичного плавления.

Таким образом, в позднем неопротерозое-кембрии в Палеоазиатском океане существовала группа океанических островов и/или симаунтов, сформированных в результате действия мантийного плюма. Геохимический состав породообразующих и редких элементов в базальтах Курайского и Катунского палеосимаунтов и засурьинской свиты характеризует эволюцию океанического магматизма на протяжении 100 млн. лет. Изучение базальтов показало существенные вариации составов: 1) базальты Курайского палеосимаунта Горного Алтая (600 млн. лет) наиболее магнезиальны и имеют самые низкие содержания LREE, TiO_2 и других несовместимых элементов ($\#Mg_{ср}=53$; $TiO_{2ср}=1,6$; $La/Sm_{Nср}=1,27$; $Nb/La_{pm\ ср}=0,66$); 2) базальты Катунского палеосимаунта Горного Алтая (550 млн. лет) менее магнезиальны и содержат больше некогерентных элементов ($\#Mg_{ср}=49$; $TiO_{2ср}=2,45$; $La/Sm_{Nср}=1,95$; $Nb/La_{pm\ ср}=1,29$); 3) базальты засурьинской свиты (490 млн. лет) Чарыш-Теректинская зоны СЗ Алтая наиболее обогащены TiO_2 , LREE и MgO ($\#Mg_{ср}=43$; $TiO_{2ср}=2,8$; $La/Sm_{Nср}=2,13$) и имеют редкоэлементный состав близкий к таковому для катунских лав ($Nb/La_{pm\ ср}=1,32$) (рис. 9).

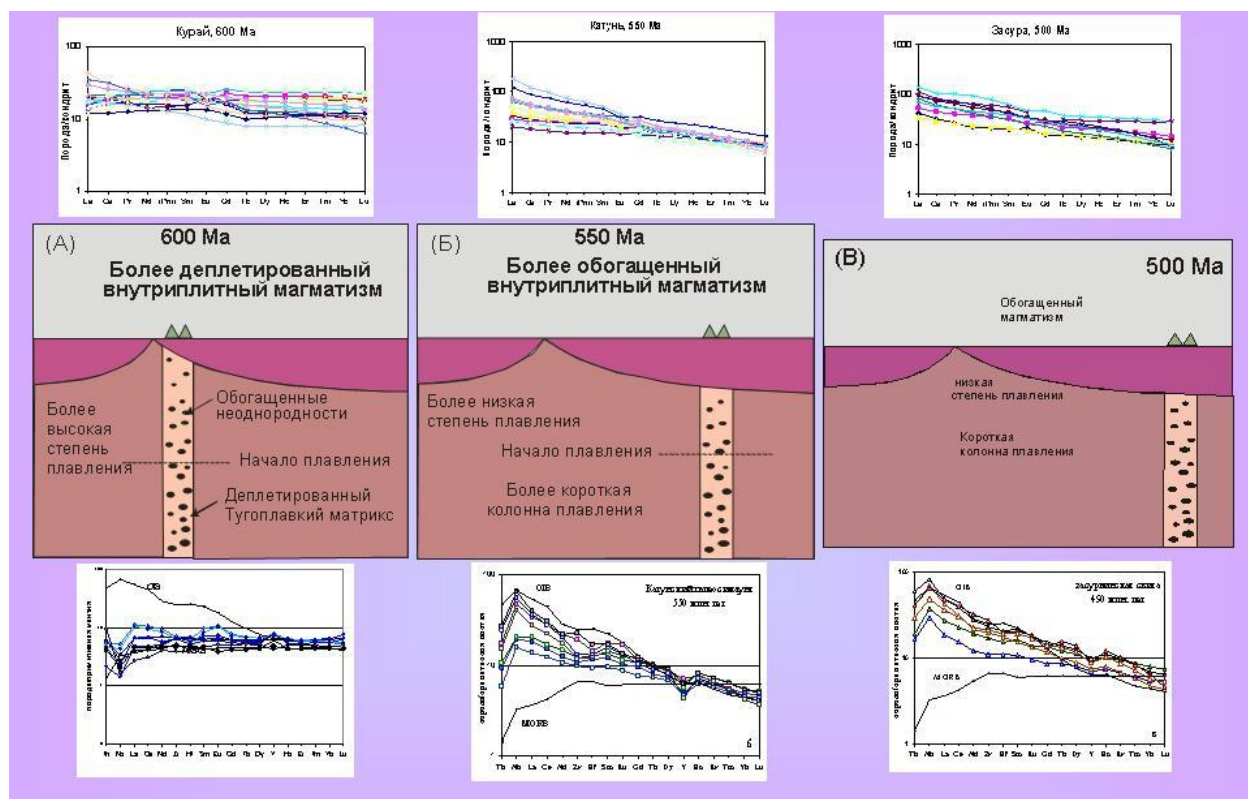


Рис. 9. Влияние мощности литосферы на состав некогерентных элементов (Regelous et al., 2003). А) Деpleted лавы являются результатом относительно высоких СЧП гетерогенной мантии. Тугоплавкий материал, истощенный некогерентными элементами, вовлекается в плавление поднимающегося мантийного плюма, если плюм расположен под более молодой, тонкой литосферой. Б) Наоборот, под более зрелой и мощной океанической литосферой средняя СЧП ниже и содержания некогерентных элементов оказываются выше за счет более легкоплавкого материала мантийных неоднородностей. При дальнейшем «старении» коры уже таких заметных изменений не происходит, т.е. скорость прироста ее мощности значительно снижается.

Sm-Nd и Rb-Sr изотопный состав лав

Получены предварительные данные по Sm-Nd и Rb-Sr изотопам для 6 образцов базальтов из Катунского и Засурьинского аккреционных комплексов. Группы изотопных составов согласуются с вещественным разделением океанического основного вулканизма и, таким образом, позволяют оценить изотопные характеристики мантийных источников разных периодов. Рассматривая полученные ранее и новые изотопные характеристики по Курайскому, Катунскому, Засурьинскому и Чарскому поясам можно отметить следующее. Общий разброс значений ϵ_{Nd} для всех типов базальтов

достаточно широк и составляет от -1,5 до +8,1 (рис. 10). Геохимические характеристики пород не позволяют уверенно говорить о существенном влиянии коровой контаминации на состав расплавов, поэтому следует говорить об участии в их формировании нескольких мантийных источников. Один из них (с пониженными значениями ϵ_{Nd}) соответствовал умеренно деплетированной (PREMA или HIMU) мантии с величиной $\epsilon_{Nd} < 5$. Источник венд-палеозойского океанического магматизма выделяется относительно повышенной величиной ϵ_{Nd} (от +5,2 до +8,1). Эти значения совпадают с таковыми, характерными для ранне- и среднепалеозойского магматизма всей ACCO, являющейся частью Центрально-Азиатского складчатого пояса (Ярмолюк, Коваленко, 2003). Самые высокие значения этой величины в предполагаемых вендских платобазальтах Палео-Азиатского океана (Курайская зона) (от +7,8 до +8,1), вероятно, связаны с участием в их образовании деплетированной мантии, обладавшей, как показывают составы базальтов типа MORB, аномальными параметрами ϵ_{Nd} (до +8,1). Самые низкие значения ϵ_{Nd} отмечены для базальтов Катунского и засурьинского аккреционных комплексов, что соответствует мантийному источнику типа PREMA и/или HIMU.

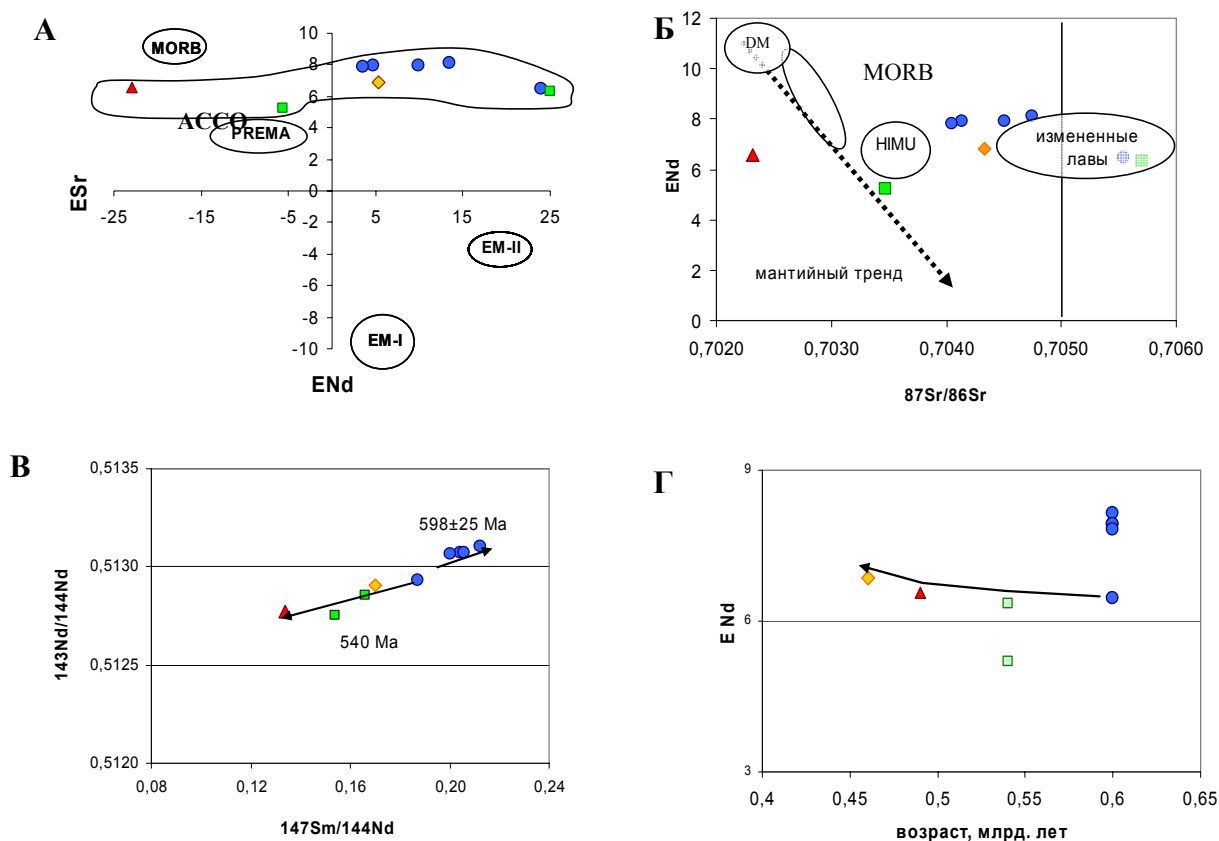


Рис. 10. А – диаграмма $\epsilon_{Sr} - \epsilon_{Nd}$. Поля для мантийных источников и магматических пород ACCO взяты из (Ярмолюк, Коваленко, 2003). Б – состав изотопов Sr и Nd для океанических базальтов западной части ACCO в сравнении с измененными базальтами плато Аруба (White et al., 1999). В – отношения $^{147}Sm/^{144}Nd$ и $^{143}Nd/^{144}Nd$, показывающие два тренда источников базальтов разного возраста. Г – соотношение величины ϵ_{Nd} и возраста базальтов. Обозначения базальтов: синие кружки – Курайская зона, зеленые квадраты – Катунская зона, красный треугольник – засурьинская свита, желтый ромб – Чарская зона.

На графике $\epsilon_{Sr} - \epsilon_{Nd}$ фигуративные точки венд-палеозойских базальтов группируются в первом и втором квадранте, частично вблизи поля составов источников типа PREMA (HIMU), и образуют последовательность, вытянутую вдоль абсцисс от значений $\epsilon_{Sr} \sim -23$ и $\epsilon_{Nd} \sim 6$ до $\epsilon_{Sr} \sim 25$ и $\epsilon_{Nd} \sim 7,5$. Подобный тренд вариации составов можно объяснить участием в источнике плавления компонента обогащенной Rb мантии (типа EM-II) или завышенным отношением $^{87}Sr/^{86}Sr$. В целом более обогащенные некогерентными элементами разности имеют более низкие значения ϵ_{Nd} . Семь образцов базальтов с $Nb/La < 1$ имеют самые высокие значения ϵ_{Nd} , варьирующие в интервале от +6 до +8,1. Повышенные значения $^{87}Sr/^{86}Sr$ обусловили их смещение в сторону от мантийного тренда (рис.). Такое же смещение было отмечено для измененных базальтов океанического плато Аруба (White et al., 1999). Образцы с $Nb/La > 1$ ложатся рядом с мантийным трендом, что предполагает их выплавление из мантийного источника типа HIMU ($\epsilon_{Nd} = +6,5$) и гавайского ($\epsilon_{Nd} = 5,2$), соответственно, без существенного влияния процессов контаминации.

Состав вкрапленников клинопироксена и расплавных включений в них

В целом, анализ современного состояния исследований структур древних океанических плато, симаунтов и океанических островов показал, что, несмотря на важность и значительный интерес к этим объектам, многие вопросы, связанные с особенностями их строения, состава и условий формирования остаются открытыми. Прежде всего, до настоящего времени существуют проблемы достоверной диагностики этих структур, обладающих некоторыми сходными чертами с другими океаническими и островодужными комплексами. Это связано в значительной мере с существенными преобразованиями пород. Остаются нерешенными многие вопросы физико-химических условий магматических процессов, параметров первичных глубинных расплавов и особенностей влияния мантийных плюмов. Наиболее перспективным путем решения этих проблем являются комплексные геологические, минералого-геохимические исследования и анализ расплавных включений в минералах в сравнении с данными по объектам в современных океанических областях.

Тянь-Шань

Были изучены образцы из мезозойских базальтовых комплексов Тянь-Шаня и впервые собраны коллекции образцов, представляющие практически всю обширную территорию (более 285 000 км²) проявления внутриплитного магматизма этого типа в Центральной Азии. Полученные данные по петрохимии, геохимии редких и редкоземельных элементов свидетельствует о формировании большинства рассмотренных базальтовых серий Тянь-Шаня в ходе развития внутриплитных магматических систем, имеющих глубинные мантийные плюмовые источники. В отдельных случаях устанавливаются признаки вовлечения в плавление корового материала. Составы расплавных включений и особенности распределения в них редких и редкоземельных элементов подтверждают плюмовый характер расплавов и показывают эволюцию магматических систем с увеличением роли калия, алюминия и железа. С помощью включений установлена прямая зависимость температур кристаллизации расплавов, формировавших мезо-кайнозойские базальтовые комплексы Тянь-Шаня, от их магнезиальности: пикробазальты участка Учкудук – 1220-1250°C, базальты участка Текелик - 1175-1215°C, андезибазальты участка Алаколь - 1145-1170°C.

Горный Алтай

Базальты Курайского аккреционного комплекса. Температуры кристаллизации базальтов были рассчитаны по данным изучения состава вкрапленников пироксена и экспериментов по гомогенизации расплавных включений. Они составляют, соответственно, 1100-1295°C и 1160-1190°C (Сафонова и др., 2008). Для базальтов Катунского аккреционного комплекса был определен химический состав клинопироксена из крупнопорфирового базальта усть-семиной свиты, который соответствует $Vo_{38-42}Эн_{42-52}Фс_{0-12}$ для С-72ж-04 и $Vo_{34-41}Эн_{38-47}Фс_{1-12}$ для С-73а-04, где Vo – волластонит; Эн – энстатит; Фс – ферросилит. В целом пироксены обр. С-72ж-04 содержат больше Ca, Si, но меньше Al, Fe, Ti, Na, чем С-73а-04. Все вкрапленники имеют близкие содержания MgO; #Mg варьирует в узком интервале от 78 до 83 (рис. 11).

Анализ клинопироксенов Катунского палеосимаунта показал, что по соотношению TiO₂-FeO они хорошо соответствуют пироксенам из траппов Сибири и базальтов района плато Онтонг Джава (Тихий океан), резко отличаясь по повышенному количеству титана (до 0.8 %) от минералов из срединно-океанических хребтов и островных дуг (рис. 12).

Первичные расплавные включения (до 30 мкм) обладают округлыми с некоторой прямоугольной огранкой формами. Включения многофазовые: светлая кайма «стекла» по краям + множество светлых и темных кристалликов + газовый пузырек + рудные фазы (рис. 12). В ходе эксперимента в микротермокамере полностью гомогенными включения становятся в интервале 1130-1170°C. Детальное сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало, что наиболее вероятные значения воды варьировали от 0.2 до 0.6 мас.% при давлениях 0.4-2.5 кбар. Сравнение температурных характеристик различных включений показало прямую зависимость температур гомогенизации от их химического состава. Температуры явно увеличиваются с ростом магния (6.35-6.89 мас.% MgO - 1140-1145°C, 8.18-10.42 мас.% MgO - 1170°C) и падают с увеличением железистости (0.86-1.37 - 1170°C, 1.99-2.16 - 1140-1145°C). По соотношению суммы щелочей, FeO/MgO и SiO₂ составы изученных расплавных включений располагаются в области пород нормальной щелочности и в поле толеитов. Спектры распределения РЗЭ в расплавных включениях из пироксенов Катунского палеосимаунта согласуются с данными по базальтам плато Онтонг Джава, но наиболее соответствуют характеристикам траппов Сибирской платформы, обладая несколько повышенной ролью легких лантаноидов. На диаграммах с использованием таких индикаторных редких элементов, как Nb, Th, Y, Zr, Ti, данные по расплавным включениям в клинопироксене Катунского палеосимаунта относятся к сериям с плюмовым мантийным источником.

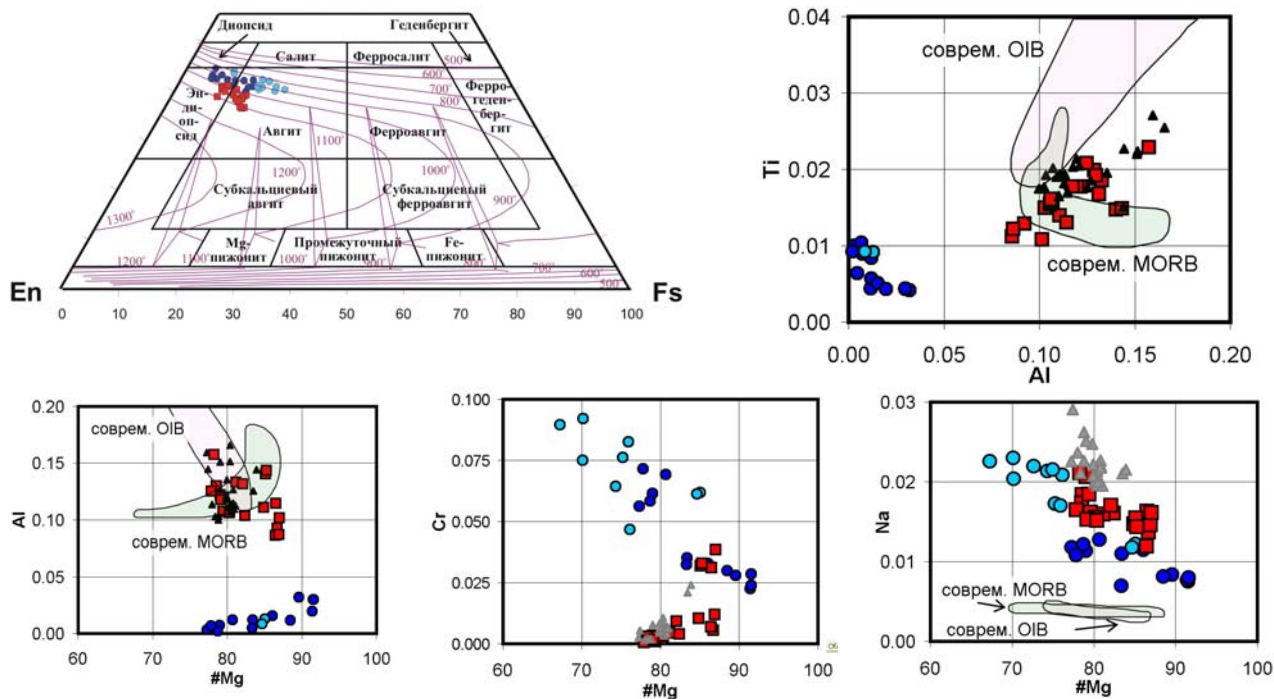


Рис. 11. Характеристика состава клинопироксенов из Курайского (треугольники) и Катунского АК.

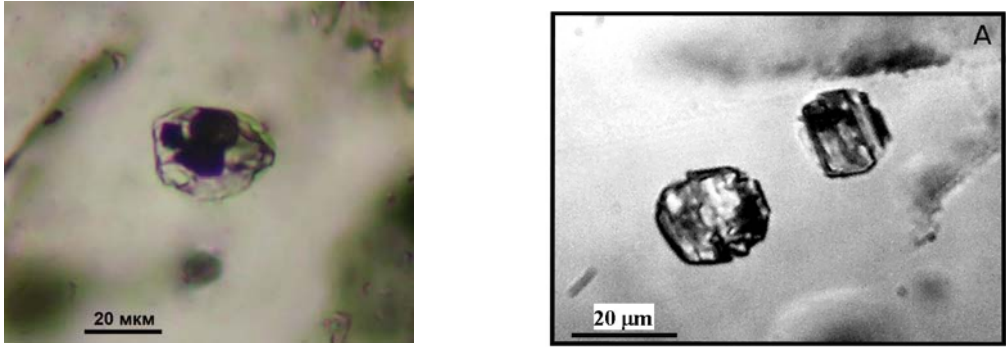


Рис. 12. Микровключения в клинопироксене из образцов базальтов Катунского (а) и Курайского (б) АК с твердой и флюидной фазами.

ЭЛЕМЕНТЫ ОКЕАНИЧЕСКОЙ СТРАТИГРАФИИ В АККРЕЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ

На примере аккреционных комплексов Японии была выделена последовательность пород океанической стратиграфии (oceanic plate stratigraphy - OPS, Isozaki et al., 1990), включающая океанические базальты (океанического дна и островов/симаунтов), пелагические осадки (ленточные/радиоляриевые кремни – донные отложения), гемипелагические осадки (кремнистые и известковистые аргиллиты, алевролиты, карбонатная брекчия – подножные и склоновые фации) и мелководные осадки океанических поднятий (слоистые и массивные рифовые известняки – карбонатная «шапка»). Внутриплитные базальты, которые раньше слагали океанические острова, симаунты и плато, находятся в основании разреза океанической стратиграфии (ОС) (рис. 13).

Как правило, чем старше симаунт, тем пелагические кремнистые осадки хуже сохраняются. Ленточные кремни были обнаружены во всех позднепалеозойских и мезозойских аккреционных комплексах: Чарском, Акиоши, Хабаровском, Тамба-Мино, Самаркинском, Чичибу, Таухинском (в порядке возрастания доли кремней по отношению в другим элементам ОС) и, в меньшем количестве, в засурьинской серии раннеордовикского возраста. Например, в самом древнем аккреционном комплексе ЮЗ Японии – Акиоши (карбон) - преобладают известняки, а в более молодых Мино-Тамба и Чичибу доминируют кремни (Isozaki et al., 1990). В самом молодом АК Японии - Южном Чичибу - отношения кремней к известнякам меняются от 3:1 до 20:1 (Onoue et al., 2004). Более древний

Засурьинский АК (ордовик) содержит меньше кремней, чем более молодой Чарский АК (карбон) (Сенников и др., 2003). В поздненеопротерозойских Джидинском и Курайском АК пелагических кремнистых осадков не обнаружено вообще – там закартированы только отложения карбонатной «шапки» и склоновые фации. Возможно, это связано с их возрастом и типом деформаций, складчатостью, разломной тектоникой, сдвигообразованием и т.д., которые являются характерными процессами, сопровождающими аккрецию, коллизию и вращение континентов (Buslov et al., 2001, 2004). Меньшая устойчивость кремнистых отложений в процессе складчатости вполне вероятна и, следовательно, в более древних и сильно деформированных структурах они либо вообще не сохранились, либо оказались погребены под деформированными отложениями аккреционных комплексов. В любом случае, ассоциация пиллоу-лав и потоков базальтов с известняками, кремнями, кремнистыми сланцами и детритовыми турбидитами является диагностическим признаком внутриплитной океанической обстановки (обстановка океанического острова) формирования пород.

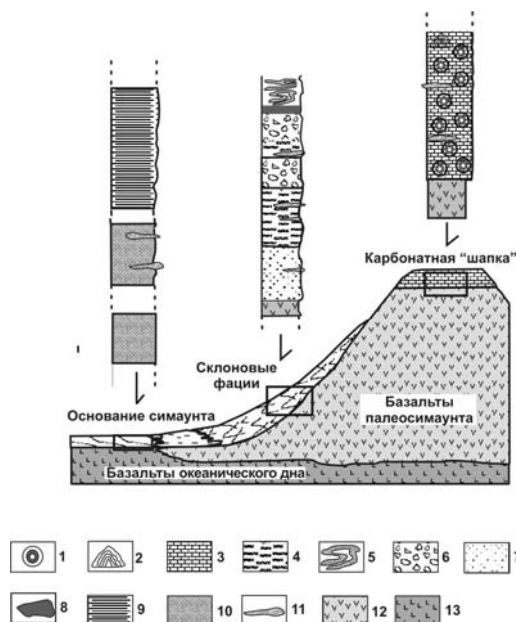


Рис. 13. Схематическая реконструкция строения палеосимаунта, перекрытого осадочными породами карбонатной «шапки» (1-3), склоновых фаций (4-8) и подошвы симаунта (9-10) (из [Isozaki et al., 1990] с изменениями). 1 – ооиды, 2 – строматолиты, 3 – массивные известняки, 4 – слоистый известковистый аргиллит, 5 – слоистый известковистый аргиллит с Z-складками, 6 – обломочный материал/брекчия, 7 – плохо сортированный известковистый аргиллит, 8 – углистые прослои, 9 – тонкослоистый известковистый аргиллит, 10 – массивный известковистый аргиллит, 11 – линзы кремней, 12 – базальты магматического тела симаунта, 13 – базальты океанического дна.

КРИТЕРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ВНУТРИПЛИТНЫХ БАЗАЛЬТОВ

Диагностика внутриплитных базальтов типа OIB имеет большое значение, т.к. в более ранних работах 70-90-х годов такие образования ошибочно принимались либо за островодужные вулканиты (IAB) либо, за офиолиты (MORB). В настоящее время, благодаря высокоточным методам анализа редких элементов и изотопов, стало возможным разделять OIB, IAB и MORB, в основном, по взаимоотношениям в системе LREE-Th-Nb. Несмотря на неоспоримую ценность геохимических характеристик, последние не должны оставаться единственным средством определения исходной тектонической обстановки формирования базальтов. В ходе работ по проекту были выделены критерии идентификации базальтов океанических островов, симаунтов и плато, ассоциирующих с осадками ОС на основе геологических и геохимических данных.

1. Наличие в разрезе элементов океанической стратиграфии, предполагающих обстановку океанического поднятия: базальт, рифовые карбонаты, обломочные терригенно-известковисто-кремнистые склоновые фации, глубоководные кремни подножия океанического острова (рис. 3, 13).

2. Базальты формируют крупные по мощности тела палеоокеанических островов, перекрытых карбонатной шапкой

3. Менее мощные лавовые потоки (1-5 м) чередуются в разрезах с терригенно-карбонатно-кремнистыми отложениями склоновых фаций: кремнистыми сланцами, аргиллитами, карбонатной брекчией.

4. Склоновые фации имеют признаки формирования на склонах вулканической постройки (конседиментационная Z-складчатость, брекчированность пород, невыдержанная мощность отложений по простиранию и т.д.) (рис. 14).

5. Средние до высоких повышенные содержания TiO_2 (>1,5) и Al_2O_3/TiO_2 (4-10 по сравнению с 15-25 в IAB и 10-15 в MORB).

6. Средние до высоких LREE ($La/Sm_n > 1.3$) и низкая до высокой степень дифференциации HREE: Gd/Yb_n может меняться от 1.0 в более молодых симаунтах (в пределах одной системы островов) и платобазальтах до 3 в базальтах Гавайского типа.

а



б



Рис. 14. Кремни (а) и обломочная карбонатная порода (б) с Z-складками

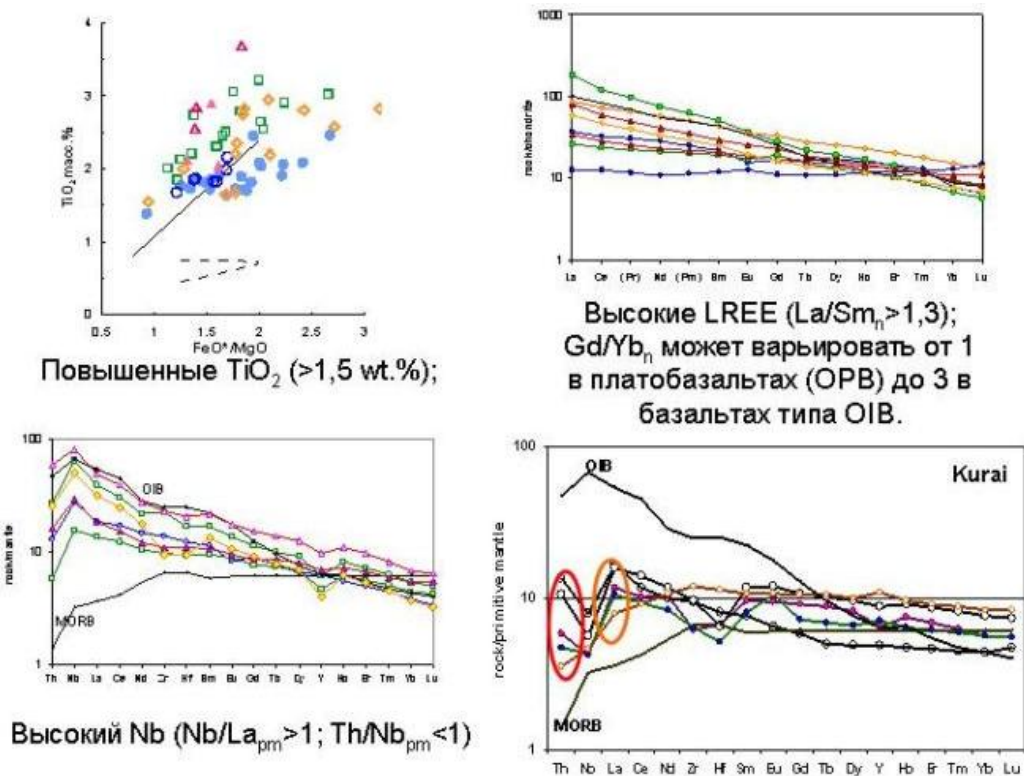


Рис. 15. Геохимические критерии выделения внутриплитных базальтов. Концентрации Nb в молодых симаунтах и океанических плато могут быть ниже, но, в отличие от надсубдукционных базальтов, в них Th/Nb_{pm} обычно меньше La/Nb_{pm} .

7. Высокие концентрации Nb или положительные аномалии Nb по La и Th ($Nb/La_{pm} > 1$; $Nb/Th_{pm} > 1$); в платобазальтах концентрации Nb могут быть ниже, однако, в отличие от IAB они менее обогащены Th и характеризуются $Th/Nb_{pm} < La/Nb_{pm}$ (рис. 15).

8. Разрезы ОС имеют структурное положение в покровно-надвиговых сооружениях аккреционных призм с участком турбидитов, офиолитов и высокобарических пород. В некоторых областях аккреционная тектоника сопровождалась сдвиговыми деформациями, что привело к формированию линейных зон, в которых выше перечисленные образования переориентированы с образованием крутозалегающих чешуйчатых структур.

9. Палеоокеанические поднятия и острова, сформированные в пределах одной океанической плиты и присутствующие в одной складчатой зоне могут иметь различный возраст, так как являются продуктом воздействия горячей точки (мантийного плюма) на движущуюся/субдуцирующую океаническую литосферу.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАРБОНАТОВ

Исследования карбонатов проводились японской стороной. До сих пор предполагаемая ранее восстановительная среда, существовавшая на поверхности ранней Земли, остается предметом дискуссий. При этом отсутствуют детальные и количественные оценки. Участники проекта выполнили *in-situ* анализ породообразующих, редких и редкоземельных элементов в мелководных карбонатах позднего неопротерозоя (эдиакарана) Азии для того, чтобы исключить вторичную карбонатную компоненту и контаминацию детритовым материалом и оценить степень восстановления морской воды на тот период времени в сравнении с результатами, полученными по карбонатам других возрастов. Содержание кислорода рассчитывалось на основе концентраций Ce и его аномалий в карбонатных минералах при заданных параметрах атмосферной углекислоты (pCO_2). Полученные результаты показали, что содержание кислорода в мелководных условиях возросло в течение последних 2,7 млрд. лет, но циклически. Максимум роста концентрации кислорода произошел в фанерозое. Расчеты для позднего эдиакарана показали низкое содержание кислорода в морской воде после событий Снежной Земли (Snowball Earth) до позднего эдиакарана, рост в позднем эдиакаране и резкое снижение на границе докембрия и кембрия. Было предположено, что такие вариации связаны с вулканизмом, глобальной регрессией и растворением гидратов метана (Komiya et al., 2008).

Кроме того, в карбонатах Курайского АК (карбонатная «шапка» палеосимаунта) были обнаружены новые фосфор-содержащие микрофоссилии с кальций-фосфорными раковинами. Наблюдения на сканирующем электронном микроскопе показали, что раковины имеют эллипсоидную форму, более-менее одинаковые размеры около 200–300 мк в диаметре. Стенки раковин имеют толщину около 1 мк. Отсутствие внешних и внутренних структур не дало возможности детально идентифицировать эти микрофоссилии и сравнить их с уже известными палеонтологическими находками. Поэтому они рассматриваются как палеонтологическая проблематика. Микронзондовый анализ подтвердил наличие фосфора и кальция в раковинах микрофоссилий и их отсутствие в матриксе, что предполагает первичный фосфатный состав раковин. Хотя фосфатные микрофоссилии нетипичны для эдиакарана (они более характерны для нижнего кембрия, в особенности, для трилобитовых ассоциаций с SSF), мы не считаем, их раннекембрийскими, т.к. эдиакаранский возраст был надежно определен для курайских карбонатов Pb-Pb изотопным методом (Uchic et al., 2004). Таким образом, сделанная находка является первой для границы докембрий-кембрий в Центральной Азии, и она подтверждает, что мелководные участки океанических поднятий и шельфа уже были заселены многоклеточными во время переходного периода от эдиакарана до раннего кембрия (Uchic et al., 2008).

Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем:

Изучение фрагментов древней океанической литосферы, входящих в состав складчатых поясов, необходимо для понимания эволюции океанов прошлого и процессов роста континентальной коры в ходе аккреционно-коллизийных событий. Следы древних океанов обнаружены во многих аккреционных комплексах всего мира. С геохимической точки зрения лучше всего изучены архейские, протерозойские и мезозойские зеленокаменные пояса, включающие фрагменты офиолитов (тип MORB) и плюмовых базальтов (тип OIB), и аккретированные океанические плато (Kerr et al., 2003). Среди докембрийских комплексов выделяются зеленокаменные пояса Австралийского (Komiya et al., 2002, 2004 и др.), Североамериканского (Desrochers et al., Kimura et al., 1993; 1993; Stern et al., 1995; Lucas et al., 1996; Sculski, Percival, 1996; Fan, Kerrich, 1997; Polat et al., 1998, 1999; Hollings, Wyman, 1999), Африканского (Abouchami et al., 1990; Boher et al., 1992; De Wit et al., 1992; Stein, Goldstein, 1996) и Сибирского (Puchtel, Zhuravlev, 1993; Bruguier, 1996) кратонов, а также Балтийского щита (Puchtel et al., 1997, 1998). Среди мезозойских комплексов лучше всего изучены более молодые аккретированные внутриплитные и спрединговые океанические базальты Японии (Jones et al., 1993; Herzig et al., 1994; Kimura et al., 1994; Sano et al., 2000; Tatsumi et al., 2000; Koizumi and Ishiwatari, 2006) и североамериканских Кордильер (Richards et al., 1991; Mikhalyuk et al., 1994; Lassiter et al., 1995 и др.).

В тоже время позднепротерозойские и палеозойские внутриплитные океанические базальты долгое время оставались без внимания с точки зрения детального изучения их редкоэлементной и изотопной геохимии и петрологии. В разное время фрагменты коры Палеоазиатского океана,

включающие базальты океанического дна, сформированные в срединно-океанических хребтах (MORB), и внутриплитные базальты океанических поднятий (океанических островов и плато – OIB и OPB, соответственно) были обнаружены во многих складчатых структурах Алтае-Саянской области (АССО) [Рифейско-нижнепалеозойские офиолиты ..., 1985; Добрецов и др., 1992, 2004, 2005; Симонов, 1993; Симонов и др., 2004; Берзин, Кунгурцев, 1996; Буслов, Ватанабе, 1996; Куренков и др., 2002; Buslov et al., 1993, 2001; Safonova et al., 2004 и др.]. Однако детального изучения их геохимии и петрологии современными методами не проводилось.

Но не только в АССО, многие районы которой довольно трудно доступны, но и в пределах такой хорошо изученной территории, как Японские острова, и в других районах мира большая часть складчатых комплексов или аккреционных поясов изучалась либо только с геологической точки зрения (Matsuoka, Yao, 1990; Isozaki et al., 1990; Isozaki, 1997; Wakita, Metcalfe, 2005), либо только с геохимической (Polat et al., 1999; Sano et al., 2000; Tatsumi et al., 2000; Koizumi, Ishiwatari, 2006; Ichiyama et al., 2006). При этом относительно мало работ, представляющих геологические и геохимические данные в совокупности и проводящих их детальную корреляцию (Buslov et al., 2001, 2002; Safonova et al., 2004; Gordienko et al., 2007). Именно поэтому основное отличие и преимущество нашего подхода от мирового уровня состоит в комплексном подходе к отбору, анализу и интерпретации данных.

Результаты, полученные по проекту в рамках каждого метода и подхода, соответствуют самому высокому мировому уровню и даже превосходят его с точки зрения детальности изучения конкретных геологических объектов, широкого спектра использованных методов исследования и совокупной, комплексной интерпретации всех видов данных: геологических, литолого-стратиграфических, геохронологических, изотопно-геохимических и петрологических. Самым важным итогом нашей работы является создание базы геохимических данных по плюмовым базальтам Азии и выяснение, какие области Азии и интервалы магматизма такого типа еще недостаточно изучены.

Геологическое положение внутриплитных базальтов Горного Алтая

Происхождение базальт-осадочных толщ в составе раннепалеозойских складчатых поясов западной части Алтае-Саянской складчатой области является предметом многочисленных дискуссий (Гусев, 1991; Берзин и др., 1994; Гибшер и др., 1997; Добрецов и др., 2004; Зыбин, 2006 и др.). На основе изучения геохимически и геохронологически различных вулканических и осадочных пород, тектонически совмещенных в единую складчатую структуру, а также с учетом региональной тектоники Буслов с соавторами (Buslov et al., 2001) интерпретировали Катунскую зону Горного Алтая как часть аккреционной призмы Кузнецко-Алтайской островной дуги, сформированной на окраине Сибирского континента в результате ранне-среднекембрийского этапа субдукции коры Палеоазиатского океана. По данной модели закрытие Палеоазиатского океана привело к формированию нескольких аккреционных комплексов, которые на Горном Алтае представлены Курайской, Катунской и Засурьинской структурами, а в Восточном Казахстане – Чарским поясом. Эти аккреционные комплексы образовались в ходе трех основных этапов эволюции палеоокеана, сопровождавшихся процессами субдукции, аккреции и коллизии. Субдукция коры Палео-Азиатского океана в среднем кембрии привела к образованию Курайской и Катунской аккреционных призм. Засурьинский комплекс входит в состав Чарыш-Теректинской зоны сдвигов, которая ограничивает Горный Алтай с юга и представляет собой позднедевонско-раннекарбонную зону сочленения Алтае-Монгольского микроконтинента гондванской группы с Сибирским континентом. В ходе этих тектонических процессов в зону коллизии были вовлечены фрагменты океанической литосферы, в состав которой входили и океанические острова. Чарская зона сдвигов маркирует позднекарбонно-раннепермскую структуру сочленения Казахстанского и Сибирского континентов, которая сформировалась в результате закрытия Обь-Зайсанской ветви Палео-Азиатского океана (Буслов и др., 2003).

Геологические данные по детальному строению аккреционных комплексов для большинства объектов «рассеяны» по многочисленным статьям, опубликованным в разных журналах с разной степенью доступности. Имеющиеся монографии, сборники статей и геологические отчеты по складчатым поясам Алтае-Саянской области, Дальнего Востока и Японии представлены на русском и японском языках и являются практически недоступными для мирового сообщества. То же самое относится и ко многим аккреционным комплексам Китая. Поэтому проделанная участниками проекта огромная работа по сбору такой информации и составлению обобщенных разрезов и стратиграфических колонок, несомненно, имеет большое значение. Главные результаты этой работы и перспективные объекты для будущей работы опубликованы в журналах *Ore Geology Reviews* (Safonova, 2009) и *Gondwana Research* (Safonova et al., 2010).

Геохимия базальтов

В большинстве публикаций по изучаемым объектам как российских, так и зарубежных авторов представлен разный набор редких элементов. Набор породообразующих окислов практически не отличается в разных статьях, хотя в большинстве работ японских исследователей традиционно не даются значения п.п.п. Набор же редких элементов весьма переменчив, как правило, в зависимости от используемого метода. Для анализа концентраций редких элементов наиболее широко используемыми методами являются рентгено-флуоресцентный (XRF), нейтронно-активационный (INAA) и масс-спектрометрия на индуктивно связанной плазме (ICP MS).

Результаты, полученные методом XRF, ограничиваются породообразующими элементами и Rb, Sr, Ba, Nb, Zr, Y, Ni, Co, Cr, V, Cu (Tatsumi et al., 2000), причем иногда и вовсе пятью элементами: Rb, Sr, Zr, Nb, Y (Войнова и др. 1994) или Cr, Ni, Y, Nb, Zr (Ishiwatari, Ichiyama, 2004). Кроме того, метод XRF дает очень противоречивые результаты по такому важному элементу как Nb (иногда различие составляет разы и даже порядки значений - Сафонова, 2005). В некоторых работах геохимические данные представлены в виде уже готовых диаграмм, что затрудняет их дальнейшее использование для баз данных и ре-интерпретации (Голозубов и др., 1992; Войнова, 2001; Хотин, Шапиро, 2006; Khanchuk et al., 1989)

Дополнительное использование метода INAA дало возможность получить информацию об ограниченном наборе редких земель и некоторых высокозарядных элементах: La, Ce, Nd (Ханчук и др., 1989а,б); La, Ca, Sm, Eu, Yb, Lu (Koizumi, Ishiwatari, 2006); La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Th (Sano et al., 2000; Ichiyama, Ishiwatari, 2005). При этом точность определения концентрации такого ключевого для базальтов элемента как Th находится практически на пределе возможностей метода INAA, т.е. оставляет желать лучшего. Различие значений концентраций Th, полученных методами INAA и ICP MS, достигает 25-30% (Ichiyama et al., 2006).

Наиболее надежные результаты получаются методами XRF для породообразующих и ICP MS для практически всех редких элементов, встречающихся в базальтах (Polat et al., 1999, Regelous et al., 2003 и др.).

В ходе работ по проекту получены полные наборы данных по породообразующим (XRF) и редким (ICP MS) элементам для всех отобранных образцов пород. Несколько образцов, в целях контроля, были проанализированы на двух установках ICP MS – в ИГМ СО РАН и ТИТ. Именно анализа всего набора редких элементов позволил составить единообразную базу геохимических данных по всем регионам проявления океанического внутриплитного магматизма, которая доступна для геологического сообщества в виде публикаций и на взб-сайте проекта (<http://igc.igm.nsc.ru/images/sotr/safonova/project/rfbr-jsp%20project.htm>). Работа над базой данных продолжается, т.к. часть образцов еще находится в процессе обработки. База данных будет регулярно обновляться и после окончания проекта.

Вариации геохимического состава базальтов в зависимости от возраста

Кроме изучения геохимического состава внутриплитных базальтов с точки зрения условий их образования и воздействия извержения на окружающую среду важно изучение временных вариаций химического состава внутриплитного магматизма. Это дает возможность оценить влияние, в частности, мощности океанической литосферы на состав внутриплитных лав (Basu, Faggart, 1996; Dupuy et al., 1993). Например, состав лав, изливавшихся над Гавайской горячей точкой, за 85 млн. лет существенно изменился (Regelous et al., 2003). Чаще всего геохимические вариации состава внутриплитных базальтов объясняют их изливанием на различном расстоянии от зоны спрединга и/или изливанием на океаническую литосферу разного возраста и, следовательно, разной мощности (Regelous, Hofmann, 1999; Regelous et al., 2003).

Разнообразие составов некогерентных элементов трех групп внутриплитных базальтов разного возраста (600, 540 и 490 млн. лет) можно объяснить различными степенями частичного плавления и смешением деплетированных и обогащенных расплавов. Под смешением мы подразумеваем участие в расплаве истощенного верхнемантийного компонента (низкие LREE, Nb/La_{pm}, Th/Nb_{pm}) и обогащенного нижнемантийного компонента (высокие LREE, Nb/La_{pm}, Nb/Th_{pm}, TiO₂). Коровая контаминация и участие субдукционного компонента маловероятны из-за, соответственно, низких содержаний Th (Th/La_{pm}=0,3-0,9) и отношения Th/Nb_{pm} ниже, чем La/Nb_{pm}, что характерно для надсубдукционных расплавов (рис. 9). Причиной существенного различия степени обогащения или истощения внутриплитного мантийного источника могла быть разная толщина океанической литосферы, на которую изливались базальты, и как результат этого – различные степени частичного плавления, что связано с глубиной выплавления базальтов и/или высотой мантийной колонны. Если допустить существование гетерогенной мантии, состоящей из деплетированного тугоплавкого

матрикса и более легкоплавких неоднородностей, обогащенных некогерентными элементами [Regelous et al., 2003 и ссылки там], то можно предположить, что внутриплитные лавы, излившиеся на более тонкую литосферу, выплавлялись при более высоких степенях плавления, чем расплавы, образующиеся под более мощной литосферой. Это объясняется тем, что вышележащая литосфера ограничивает верхнюю границу мантийной колонны в ходе декомпрессионного плавления (Ellam, 1992). С возрастом, т.е. ростом мощности океанической коры, высота колонны расплавленного материала уменьшается по сравнению с более молодой, тонкой литосферой, соответственно, уменьшается степень плавления, и в расплав вовлекается меньше тугоплавкого деплетированного материала.

Такого рода геохимические вариации характерны для многих цепочек подводных гор возраста до 85 млн. лет (Regelous et al., 2003; Ito, Mahoney, 2005). Но для более древних океанических поднятий или подводных гор, которые сохранились во многих аккреционных поясах Дальнего Востока, Японии, Австралии и Канады (Ханчук и др., 1989; Войнова и др., 1994; Гордиенко и др., 2007; Isozaki et al., 1990; Polat et al., 1999; Komiyu et al., 2002), таких исследований еще не проводилось. Проблема в том, что в результате тектонических процессов первичные взаимоотношения вулканитов и ассоциирующих осадочных пород, как правило, нарушены, и поэтому очень сложно определить возраст базальтов из разных комплексов и обосновать их связь с эволюцией одного палеоокеана, одной океанической плиты и/или одной горячей точки. Курайский (600 млн. лет), Катунский (550 млн. лет) и Засурьинский (500 млн. лет) палеоострова представляют собой уникальные объекты с сохранившимися первичными взаимоотношениями базальтов и осадочных толщ, по которым был надежно определен их возраст. Это позволило привязать эти объекты к имеющимся геодинамическим палеореконструкциям (Buslov et al., 2001; 2002). Этот подход был частично (для Курайского и Катунского АК) реализован в работе (Сафонова, 2008). Для Засурьинского АК такой подход позволяет решать и обратную задачу – определение возраста тектонических пластин, состоящих из базальтов и океанических осадков, относительно друг друга на основе степени обогащения слагающих их внутриплитных базальтов некогерентными элементами. Статья, обсуждающая эти вопросы, подготовлена для опубликования в *Chemical Geology*.

Периодичность океанического плюмового магматизма и среднеордовикская-среднедевонская пауза

На рис. 16 показаны возраста изученных базальтовых толщ и вмещающих их аккреционных комплексов. На основе данных, полученных ранее как российскими, там и зарубежными исследователями внутриплитный магматизм действовал в Палеоазиатском океане и Палео-Пацифике в период с позднего неопротерозоя до поздней юры (от 600 до 140 млн. лет) (Kanmera et al., 1990; Isozaki et al., 1990; Кемкин, Ханчук, 1994; Парфенов и др., 1995; Maruyama et al., 1997; Kojima et al., 2000; Buslov et al., 2001; Гордиенко и др., 2007 и др.). После средней юры внутриплитный магматизм действовал уже в Тихом океане. Вполне вероятно, что самые древний симаунты Императорской Цепи (ранний мел) были аккретированы к Восточной Камчатке еще в позднем мелу (Савельев, 2003). Самые молодые вулканы Гавайских островов представляют собой современное проявление внутриплитного магматизма, действовавшего в северной части Тихого океана около 85 млн. лет. Таким образом, внутриплитный магматизм действовал более 600 млн. лет и был, вероятно, связан с действием Тихоокеанского Суперплюма (Maruyama et al., 2007). Тем не менее, существует «пробел» в проявлении внутриплитного океанического магматизма со среднего ордовика до среднего девона (Safonova, 2009), который можно объяснить двояко. Первое это периодичность проявления мантийных плюмов в 120-150 млн. лет (Larson and Olsen, 1991), хотя до и после этого «пробела» внутриплитный магматизм проявлен с периодичностью 50 млн. лет и даже меньше. Второе объяснение это плохая изученность складчатых областей: возможно мы пока еще просто не нашли проявлений океанического внутриплитного магматизма этого возраста, которые могут присутствовать в таких плохо сохранившихся и сильно деформированных структурах, как большинство аккреционных комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса (Buslov et al., 2004). Кроме этого, задача усложняется тем, что эти объекты могут находиться в труднодоступных и малонаселенных областях Центрального Казахстана, Киргизии, Монголии и, возможно, Китая. В печати есть ограниченные данные (без геохимии) об офиолитовых комплексах среднепалеозойского возраста в Центральном Казахстане (Yakubchuk, Degtyarev, 1994; Якубчук, устное сообщение), Центральной и Южной Монголии (Badarch et al., 2002; Helo et al., 2006; Xiao et al., 2003). Кроме того, по устной информации, полученной от д. г.-м. н, проф. Г.С. Биске (СПбГУ), и по результатам, приведенным в любезно предоставленным им геологических отчетах, высокотитанистые океанические базальты среднедевонского возраста, встречаются в силурийско-девонских разрезах Южного Тянь-Шаня, вдоль рек Киргизата, Чиле, Акбура, Чачме, Нарын, Пикертык и др. Их изучение требует специального

проекта, в рамках которого будут необходимы как полевые работы, так и анализ большого количества образцов на геохимию породообразующих и редких элементов и изотопию. В связи с ограниченностью такой информации в настоящее время полученные нами первые результаты по раннедевонским ОИВ Монголии имеют крайне важное значение. Открытие среднеордовикских-раннедевонских толщ океанической стратиграфии с внутриплитными базальтами могло бы подтвердить непрерывный характер внутриплитного магматизма в целом, и Палеоазиатского океана и Палео-Пацифики в частности.

Период	NP			Кембрий			Ордовик			Силур			Девон			Карбон		Пермь			Триас			Юра			Мел							
Эпоха	П	Р	С	П	Р	С	П	Р	С	П	Р	С	П	Р	С	Р	П	Р	С	П	Р	С	П	Р	С	П	Р	М						
АК																																		
Курайский	■			■																														
Катунский	■			■																														
Засурьинский																																		
Уланбаторский																																		
Чарский																																		
Акиоши-Хабаровский																																		
Мино-Тамба-Самаркандский																																		
Ю. Чичibu-Таухинский																																		

Рис. 16. Главные периоды внутриплитного магматизма Палеоазиатского океана и Палео-Пацифики и возраст вмещающих их аккреционных комплексов. NP – неопротерозой; АК – аккреционный комплекс; четырехугольники: заштрихованные – возраст внутриплитного магматизма, заштрихованные – возраст формирования аккреционного комплекса; Р, С, П – ранний, средний и поздний соответственно.

Сравнение с другими современными и древними океанами

Полученные нами результаты по Палео-Азиатского океану и Палео-Пацифике соответствуют современному уровню публикаций по океанической стратиграфии Палео-Тетиса (Mattern, Schneider, 2000; Feng, 2002; Xiao et al., 2003; Hou et al., 2007) и превосходят уровень более ранних работ по этому океаническому домену (He, Liu, 1993; Hao and Hsu, 1994; Yang et al., 1996; Pan et al., 1997; Li et al., 1999). Тем не менее, основная перспектива будущих исследований состоит в сравнении и корреляции толщ океанической стратиграфии всех трех палео-океанов и уточнение единой картины их взаимосвязанной эволюции.

Полученные петрохимические и изотопные данные по вулканическим породам из фрагментов Курайского и Катунского палеоостровов Палеоазиатского океана фиксируют эволюцию внутриплитного океанического магматизма от 600 до 550 млн. лет и показывают, что в течение этого периода геохимический и изотопный состав лав существенно изменился (Сафонова, 2008). Уровень исследований геохимии базальтов соответствует уровню аналогичных исследований для Императорско-Гавайской цепи подводных гор (Regelous et al., 2003). По аналогии с такими хорошо изученными и более молодыми объектами было предположено, что фактором временного изменения геохимической специфики внутриплитного магматизма Палеоазиатского океана могли быть меняющиеся степени плавления гетерогенной по составу мантии и различная мощность океанической литосферы на момент образования расплавов.

Исследование карбонатов

В мировом опыте изучение геохимического и изотопного состава имеет достаточно короткую историю. Оно стало актуальным только в последние годы в связи с появлением теории «Снежной Земли» (Snowball Earth). Расшифровка резких перемен окружающей среды и появление животных после неопротерозойского события Снежной Земли являются важными моментами для нашего понимания эволюции природной среды на поверхности Земли и его влияния на развитие жизни в

течение всей геологической истории. Особый интерес представляет появление двух типов многоклеточных животных, таких как губки (стрекающие кишечнорастворимые) и эдиакаранская фауна, в позднем неопротерозое, которое явилось поворотной точкой биологической эволюции. Ранее было проведено исследование хемотратиграфии карбонатных пород нескольких областей Южного Китая и проанализирован их изотопный (углерод, кислород, стронций, кальций) и химический (железо, марганец, фосфор) состав для изучения эволюции состава морской воды на границе докембрия и кембрия. Полученные результаты по изменению пиков изотопов кислорода, углерода и стронция показали, что глобальное похолодание около 580 млн. лет назад вызвало глобальную регрессию и усиление процессов выветривания и континентальной эрозии, а также разложение захороненного органического углерода и/или снижение первичной производительности органического мира. Далее ближе к границе нижнего кембрия глобально похолодание прекратилось, что привело к восстановлению производства органического материала и трансгрессии (Sawaki et al., 2008; Ohno et al., 2008; Ishikawa et al., 2008; Komia et al., 2008b). Одновременное появление эдиакаранской фауны и рост положительных аномалий по $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ предполагает, что это связано с усилением процессов континентального выветривания, т.е. поступления в морскую воду питательного вещества в виде продуктов эрозии. Было выделено два отрицательных пика изотопов углерода (13). Первый – в связи с глобальной регрессией, распадом Гондваны и усилением вулканизма на границе докембрия и кембрия, что привело к подавлению органической жизни и снижению содержания кислорода в морской воде. Вторая аномалия связана, вероятно, с глобальной регрессией и последующим растворением гидратов метана непосредственно у нижней границы верхнего раннего кембрия (немакит-далдын-томмотиан). Усиленный снос питательного материала в морскую воду привел в резкой смене биологической эволюции вместо ожидаемого повышения содержания кислорода в воде. Кроме того, дефицит кислорода в морской воде расширяет поле устойчивости некоторых нутриентов, например, фосфора, кальция и железа, что и обеспечило появление многоклеточных. Поэтому полученные в ходе реализации нашего проекта данные по геохимии карбонатов (Komia et al., 2008) и по многоклеточным микрофоссилиям в венд-кембрийском Курайском АК (Uhcio et al., 2008) имеют важное значение для изучения границы докембрий-кембрий в целом и причин смены биологической эволюции в частности.

Петрологические исследования

Насколько досконально и самыми современными методами изучены молодые океанические базальты горячих точек и плато (Гавайские, Онтонг-Джава, Буве, Исландия, Кергелен, Пасха и т.д.), настолько плохо изучена петрология древних океанических базальтов (по данным минералогии и расплавных включений), которые являются «неблагодарными» объектами такого рода исследований из-за своей измененности. Единичные работы по зеленокаменным поясам Австралии и Канады, где представлены данные по составу вкрапленников и результаты петрологического моделирования (Komia et al., 2002; 2004), не решают эту проблему. Поэтому нельзя переоценить значение полученных нами данных по минералогии и петрологии фенокритов и расплавных микровключений в них. Что касается последних, то термобарогеохимических данных по включениям в древних океанических базальтах в литературе вообще практически нет, кроме единичных работ участника проекта Симонова В.А. (см. раздел «Результаты»). Полученные результаты по составу вкрапленников в базальтах и расплавных включений в них, а также по термометрии включений понята в печать в журнале «Геология и геофизика» (Симонов и др.).

Таким образом, при проведении своих исследований участники проекта руководствовались самыми современными концепциями и методами изучения геодинамических обстановок формирования, мантийных источников, петрологии и постагматических изменений внутриплитных/плюмовых базальтов, входящих в состав аккреционных комплексов складчатых областей. Такой современный подход предполагает детальное изучение их редкоэлементного, редкоземельного и изотопного состава, состава минералов-вкрапленников и включений в них, определение возраста с помощью как палеонтологических, так и высокоточных изотопных методов и аппаратуры, обязательную корреляцию геохимических данных с геологическими. В публикациях многих исследователей представлены результаты такой работы, выполненной в самых разных регионах Земли и на самом высоком аналитическом и теоретическом уровне (Ярмолюк, Коваленко, 2003; Гордиенко и др., 2007; Mahoney et al., 1993; Hemond et al., 1993; Hards et al., 1995; Puchtel et al., 1997b; Polat et al., 1999; Condie et al., 2002; Komia et al., 2002, 2004 и др.).

Мировая практика изучения редкоэлементного и изотопного состава базальтов, минералогического изучения фенокритов и расплавных включений в них весьма обширна и позволяет проследить эволюцию океанического магматизма, а именно, состава исходных расплавов, РТ-параметры этих расплавов, состав излившихся базальтов, тип мантийных источников и т.д.

Полученные нами результаты не только соответствуют мировому уровню, но и превосходят его, в первую очередь, с точки зрения системного подхода при получении данных по всем изучаемым объектам, а также благодаря комплексному мульти-дисциплинарному подходу при интерпретации полученных результатов, включающему обязательное сочетание информации по геологическим взаимоотношениям изучаемых базальтов с другими элементами океанической стратиграфии и по литологии/возрасту ассоциирующих осадков, с полными данными по редкоэлементной и изотопной геохимии базальтов, их петрологии, палеонтологическому, изотопному и редкоземельному составу ассоциирующих карбонатов, составу летучих в расплавных включениях.