

Международный проект РФФИ-ЯОПН № 07-05-91211

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

Отчет периода 2007-2008

Объявленные ранее цели проекта на 2007 год:

- 1) Получение первых данных по геохимии радиоактивных изотопов Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb для имеющейся коллекции базальтов Палеоазиатского океана для последующих геодинамических реконструкций обстановки их формирования, определения условий петрогенезиса и типа мантийного источника.
- 2) Отбор новых образцов и получение дополнительных данных по геохимии редких элементов базальтов.
- 3) Составление базы аналитических данных по мезозойским базальтам из аккреционных зон Японии и отбор новых образцов.
- 4) Получение новых данных по составу и температуре гомогенизации расплавных включений в минералах-вкрапленниках базальтов Палео-Азиатского океана и Палео-Пацифики, что позволит определить основные петрологические параметры исходных расплавов;
- 5). Составление геологических и структурных схем для комплексов, включающих внутриплитные базальты для уточнения их взаимоотношений с осадочными породами.
- 6). Построение предварительной петрологической модели плавления для венд-раннекембрийских, раннеордовикских и позднедевонско-раннекарбонатовых базальтов Палеоазиатского океана и мезозойских базальтов Палеопацифики с использованием данных по химическому составу вкрапленников клинопироксена, РТ-параметрам расплавных включений и их химическому составу, данным по геохимии породообразующих и редких элементов и по изотопному составу базальтов.
- 7) Петрографическое описание базальтов, содержащих вкрапленники и расплавные включения, для подготовки проб на SIMS анализ для последующего определения состава исходного расплава и содержания летучих в нем.
- 8) Отбор образцов карбонатных пород, их петрографическое описание для анализа редких элементов в них и реализации метода кислород-редкоэлементной барометрии карбонатных пород.

Степень выполнения поставленных в проекте задач:

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

1. В ходе полевых работ 2007 года были отобраны образцы океанических базальтов и ассоциирующих с ними радиоляриевых кремней и карбонатов из аккреционных комплексов (АК) Горного Алтая (Курайский комплекс, поздний неопротерозой, 10 шт.; Катунский комплекс, ранний кембрий, 27 шт.), Рудного Алтая (Засурьинский комплекс, ранний ордовик, 9 шт.), Дальнего Востока (Хабаровский комплекс, поздний триас, 12 шт.), Японии (Мино-Тамба, карбон-пермь-триас, 28 шт.) и Монголии (Уланбаторский комплекс, возраст неизвестен, ориентировочно силур-девон – будет определяться по ассоциирующим радиоляриевым кремням, 8 шт.).
2. В ходе полевых работ 2008 года были отобраны образцы океанических базальтов и ассоциирующих с ними радиоляриевых кремней и карбонатов из аккреционных комплексов Восточного Казахстана (Чарский АК) и Горного Алтая (Курайский и Катунский АК). Всего за 2 полевых сезона было отобрано более 600 образцов из 6 аккреционных комплексов.
3. Для отобранных образцов 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.
4. Получены первые данные по геохимии радиоактивных изотопов Rb-Sr и Sm-Nd для базальтов Палеоазиатского океана из Катунского и Засурьинского аккреционных комплексов Горного Алтая, отобранных в ходе полевых работ 2007 года. Дополнительно в ближайшее время будет сделана Sm-Nd и Rb-Sr изотопия образцов из других комплексов, а также анализ изотопов U и Pb.

5. Составлена база 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 11 базальт-осадочным комплексам подготовлена для опубликования в журнале *Ore Geology Reviews*; уже получены положительные отзывы рецензентов, сейчас находится в стадии корректировки в соответствии с предложенными рекомендациями.
6. Получены новые данные по составу и температуре гомогенизации расплавных включений в минералах-вкрапленниках базальтов Палео-Азиатского океана из аккреционных комплексов Горного Алтая и Тянь-Шаня.
7. Выполнены задачи по картированию аккреционных комплексов с целью выявления характера взаимоотношений базальтов с осадочными породами.
8. Проведено предварительное петрологическое моделирование условий плавления позднепротерозойских и раннекембрийских базальтов Палеоазиатского океана из Курайского и Катунского аккреционных комплексов Горного Алтая соответственно на основе данных по геохимии породообразующих и редких элементов и изотопному составу базальтов, по химическому составу вкрапленников клинопироксена, РТ-параметрам расплавных включений и их химическому составу. Модели обсуждаются в статьях, опубликованных в журналах «Геология и геофизика» и «Петрология» (Сафонова, 2008; Сафонова и др., 2008). Данные модели будут применены и к базальтам из других АК.
9. Сделано петрографическое описание наиболее свежих образцов порфировых базальтов, содержащих вкрапленники с расплавными включениями. Подготовлены образцы для анализа на SIMS с целью определения редкоэлементного состава исходного расплава и содержания в нем H_2O , CO_2 , SO_2 .
10. Отобранные образцы карбонатных пород из Курайского, Катунского и Хабаровского аккреционных комплексов были отправлены в Токийский институт технологий. Там уже выполнено их петрографическое описание, и в настоящее время проводится анализ редких элементов в них для последующей реализации метода кислород-редкоэлементной барометрии карбонатных пород.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные за отчетный период важнейшие результаты:

1. Проведены полевые работы на территории 8-ми аккреционных комплексов России и Японии (июль-ноябрь 2007, июль-август 2008). Отобрано около 600 образцов пород океанической стратиграфии: базальтов, карбонатов и кремней.
2. Проанализировано 54 образца базальтов на содержание породообразующих, редкоземельных и редких элементов (XRF, ICP MS).
3. Проанализировано 6 образцов базальтов на содержание изотопов Sm-Nd и Rb-Sr.
4. По результатам предварительной обработки геохимических данных выявлены базальты плюмового типа (OIB) во всех АК и базальты типа MORB в Атбашинском АК.
5. Получены первые данные по составу вкрапленников клинопироксенов и их расплавных включений, включая состав редких элементов и летучих для базальтов Катунского АК. Подготовлены образцы для аналогичных исследований по Чарскому 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. Подготовлены образцы карбонатов для анализа на редкие земли и изотопы кислорода. Сейчас образцы в работе в Японии.
8. Опубликовано 9 печатных работ, включая 2 статьи в рецензируемых журналах. Подготовлено к печати еще 3 статьи в рецензируемых журналах.
9. Подготовлены детальные геологические схемы для Курайского и Катунского АК и обобщенные колонки океанической стратиграфии для всех аккреционных комплексов.
10. Составлена база геохимических данных по аккреционным поясам Центральной Азии, Дальнего Востока и Японии, включая и опубликованные и оригинальные данные.
11. Участники проекта приняли участие в 5-ти научных конференциях при поддержке фонда.
12. Проведен совместный российско-японский семинар по итогам работ 1-го года реализации проекта и обсуждению проблем состава и температур мантии, периодичности континентального роста в связи с плюмовыми процессами и влияние последних на изменения окружающей среды (июль 2008, Новосибирск).
13. Подготовлена веб-страница по Проекту.

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, которые необходимы для проведения корреляций между океаническими образованиями Палео-Азиатского океана (Курайский, Катунский, Засурьинский, Атбашинский, Улан-Баторский и Чарский комплексы) и Палео-Пацифики (Хабаровский комплекс и Тамба-Мино).

2. Впервые было проведено детальное опробование известняков «карбонатной шапки» палеоостровов для изучения их редкоэлементного и изотопного состава в Токийском институте технологий. Уже в октябре 2007 года образцы были доставлены в Японию. В настоящее время закончился период подготовки образцов к аналитическим работам. Японская сторона планирует начать анализ карбонатов в ближайшее время.

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, южный Казахстан - северная Киргизия, 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 Восточном Казахстане. 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.

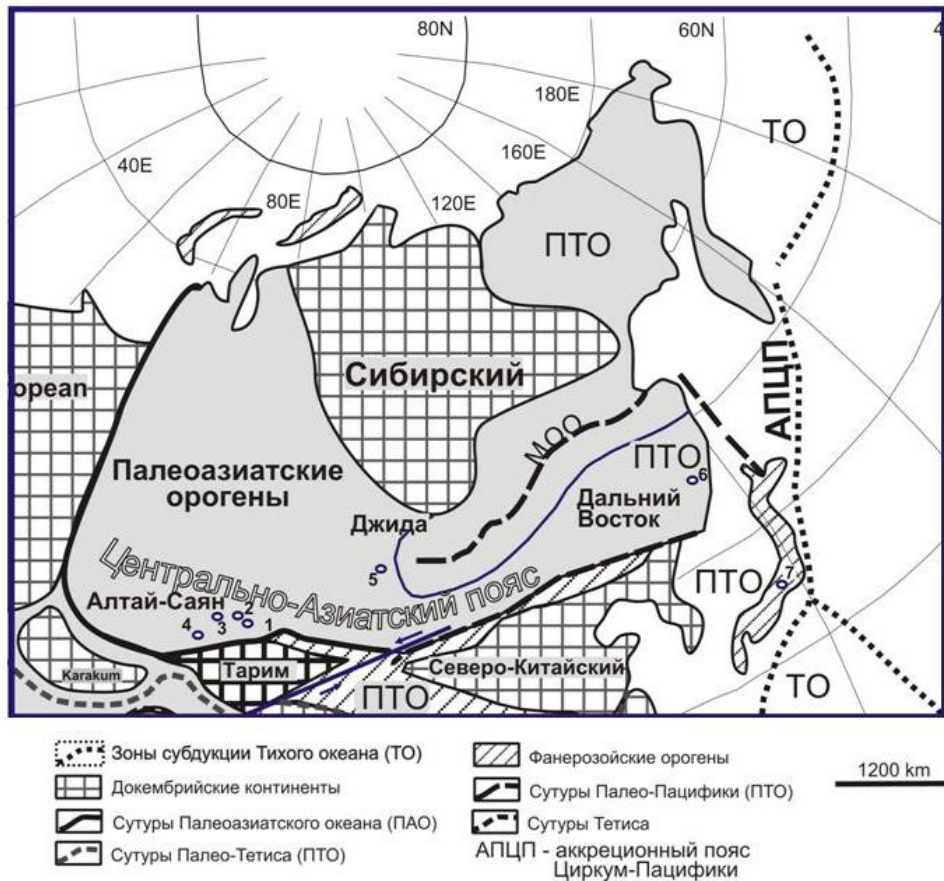
Взаимное положение изученных аккреционных комплексов показано на рис. 1.

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) каждого аккреционного комплекса.



Аккреционные комплексы: 1 – Курайский, 2 – Катунский, 3 – Засурьинский, 4 – Чарский, 5 – Улан-Баторский, 6 – Хабаровский, 7 – Тамба-Мино

Рис. 1. Тектоническая схема северной и центральной Азии, показывающая основные орогенные пояса, сформированные при закрытии палео-океанов - из (Li, 2006) с изменениями.

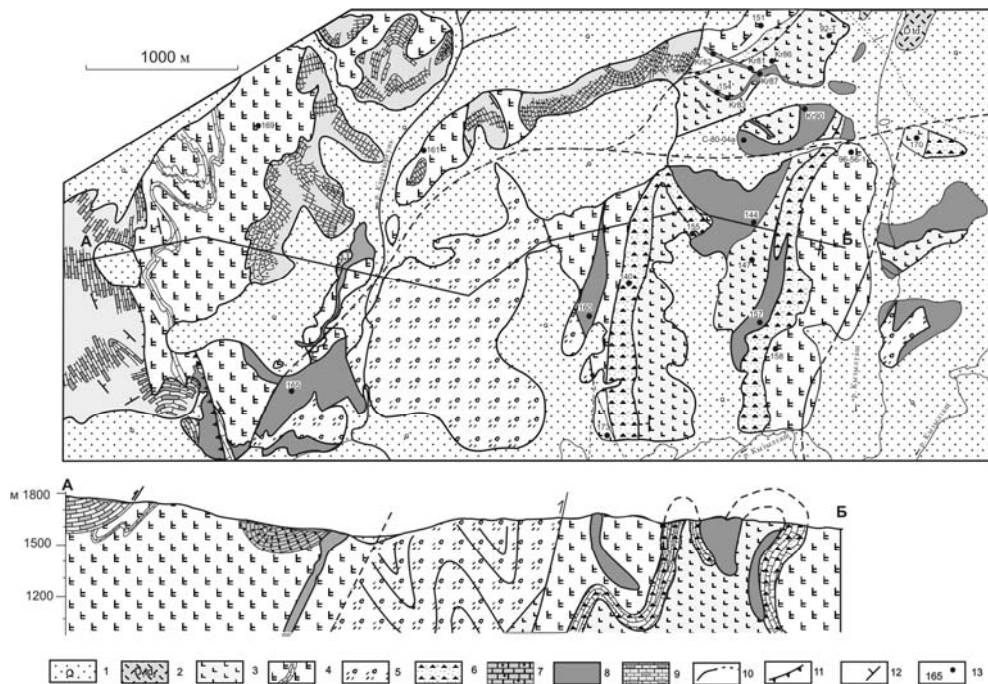


Рис. 2. Детальная геологическая схема участка Курайского АК в бассейне р. Каратюргунь ([Добрецов и др., 2004] с изменениями). 1 – четвертичные отложения; 2 – раннедевонские вулканогенно-осадочные породы; 3 – вендские (?) базальты типа N-MORB; 4-9 – поздневендские комплексы пород Курайского палеосимаунта: 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 Rх-базальтовых порфиритов с характеристиками

ОРВ, 9 – докембрийские (?) сероводородные доломиты и известняки; 10 – сдвиги; 11 - надвиги; 12 – элементы залегания слоистости; 13 - место отбора образцов.

III. Геохимические исследования

К настоящему времени уже проанализирован состав породообразующих, редких и редкоземельных элементов для всех образцов базальтов, отобранных в ходе полевых работ 2007 года. Это образцы по Катунскому, Засурынскому, Улан-Баторскому, Мино-Тамба 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 и Засурынского АК получены первые изотопные данные. Всего получено 62 анализа на породообразующие окислы, 54 анализа на редкие элементы и 6 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. Часть данных уже готовится к печати. Предварительные геохимические данные представлены на веб-сайте проекта <http://www.igm.nsc.ru/igm/sitesafonova/safonova-index.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 уже получены первые, но пока предварительные, данные по количеству и составу летучих в исходной магме (вулканической двуокиси углерода и воды). Окончательные результаты по концентрациям летучих в расплавных микровключениях будут получены осенью 2008 года и будут использованы для оценки степени воздействия активности суперплюмов на окружающую среду.

V. Геохронология

1. В процессе исследования сейчас находятся образцы дайковых серий пород – долеритов, диабазов и микрогаббро с внутриплитными геохимическими характеристиками - для определения их возраста изотопными методами (Ar-Ar по плагиоклазу и U-Pb по бадделету). Анализ на Ar-Ar будет проводиться в ИГМ СО РАН, а на U-Pb – в Токийском институте технологий.

2. В самое ближайшее время будут получены результаты палеонтологического изучения образцов радиоляриевых кремней Улан-Баторского комплекса Центральной Монголии, которое проводится японской стороной.

3. В процессе подготовки к палеонтологическим исследованиям находятся образцы карбонатов и кремней из Чарской зоны Восточного Казахстана, отобранные в июле 2008 г.

Степень новизны полученных результатов:

Океанические базальты древнего возраста (докембрий-ранний палеозой) 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 перерыв в 100 млн. лет (средний ордовик – средний девон) для плюмового магматизма. Сделано предположение, что или 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 (Буртман, 2006).

ГЕОХИМИЯ БАЗАЛЬТОВ

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; Сафонова и др., 2008; Xiao et al., 2007; Miao et al., 2007).

Поэтому полученные нами новые геохимические данные по редкоэлементному и изотопному составу базальтов, а также предварительные данные по температурам гомогенизации и составу расплавных включений, являются пионерными и позволят 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 проводится их обработка.

Обобщение полученных ранее результатов по Курайскому палеосимаунту

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).

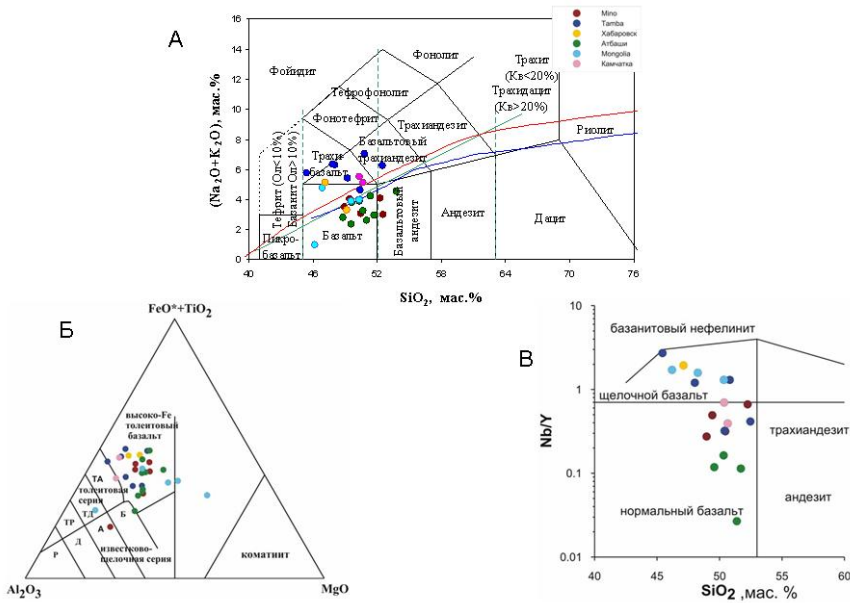
Базальты формировались в геодинамических обстановках срединно-океанических хребтов, океанических островов и плато. Тесная связь базальтов плюмового происхождения с базальтами срединно-океанических хребтов предполагает существование в вендское время в Палеоазиатском океане океанических островов и плато. 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.

Новые результаты по Катунскому палеосимаунту

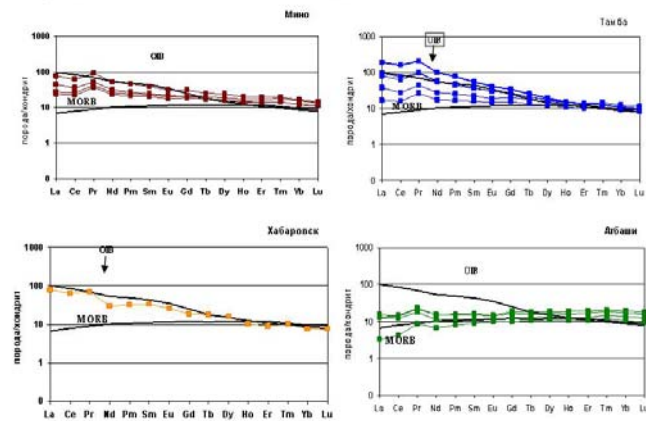
Катунская зона расположена в северной части Горного Алтая, который является западным сегментом Алтае-Саянской складчатой области, и включает в себя вулканогенные и осадочные образования вендской островной дуги, преддугового прогиба, а также аккреционного комплекса Кузнецко-Алтайской островной дуги, сформированной 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.).

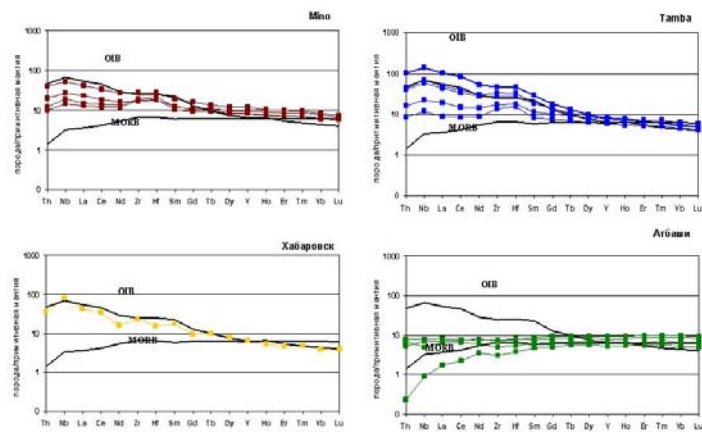
Классификационные диаграммы: А - TAS (Le Maitre et al., 1989), Б - Nb/Y – SiO₂ (Winchester and Floyd, 1977), В - Al₂O₃-FeO*+TiO₂-MgO (Jensen, 1976) для базальтов из аккреционных комплексов Японии, Дальнего Востока, Монголии и Тянь-Шаня



Нормированные по хондриту спектры REE для базальтов из аккреционных комплексов Японии, Дальнего Востока и Тянь-Шаня



Нормированные по примитивной мантии мульти-компонентные спектры для базальтов из аккреционных комплексов Японии, Дальнего Востока и Тянь-Шаня



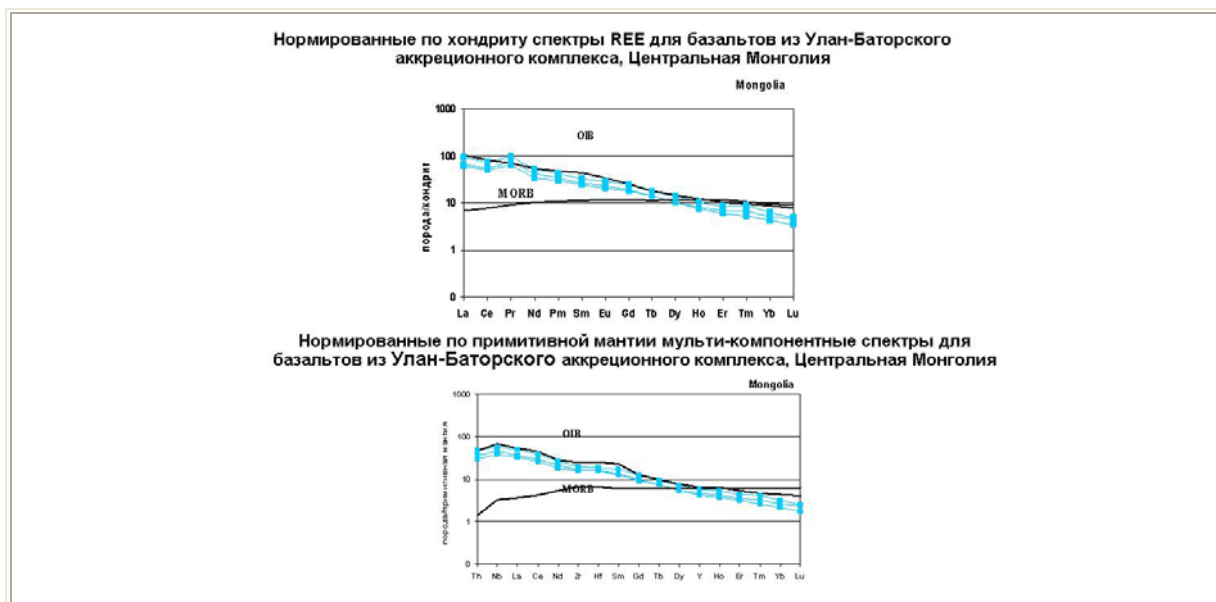


Рис. 3. Предварительные результаты геохимических исследований первого года реализации проекта.

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-семиной свиты в геологической структуре Катунской зоны секут (дайки) и перекрывают (лавы) раннекембрийские отложения аккреционного клина. По составу они представлены высокомагнезиальной и низкомагнезиальной группами. Для базальтов характерно низкое содержание TiO_2 ($TiO_{2cp.}=0,67$ мас.%), плоские спектры редкоземельных элементов ($La/Sm_n=1,03-1,73$) и более выраженные отрицательные аномалии Nb по отношению к Th ($Nb/La_{pmcp.}=0,47$; $Nb/Th_{pmcp.}=0,58$). Степень плавления мантийного источника предполагается на уровне шпинелевой фации ($Gd/Yb_{ncp.}=1,41$). Основываясь на геологических сведениях и геохимических характеристиках, можно сделать предположение об их образовании в надсубдукционной обстановке (рис. 3).

Новые результаты по Засурынскому палеосимаунту

Океанические базальты засурынской свиты были обнаружены в 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.

Для внутриплитных базальтов засурынской свиты характерно наличие тренда обогащения пород железом в ходе фракционирования, причем содержание титана при этом тоже увеличивается с ростом FeO^*/MgO . Засурынские базальты имеют содержания TiO_2 (1,4-3,8) и

величины отношения FeO^*/MgO , меняющиеся от 1 до 2, которые соответствуют низкой степени дифференциации. Содержание MgO варьирует от 5 до 8 мас.%. Отношение Ba/Rb варьирует в пределах от 5 до 26, подтверждая подвижность крупноионных литофильных элементов.

Выделяется два типа внутриплитных базальтов: переходные и обогащенные. Все базальты характеризуются высокими содержаниями несовместимых элементов и повышенными (по сравнению с MORB) отношениями несовместимых элементов к совместимым ($Zr/Y=4-11$ по сравнению с 2-4 для MORB) и более низкие отношения Al_2O_3/TiO_2 (4-6 в среднем в отличие от 8-11 для MORB). По сравнению с обогащенными разностями переходные базальты имеют близкие содержания Al_2O_3 (15 vs 16 мас.%), но немного более высокие значения Al_2O_3/TiO_2 (6,5 vs 5,5), более высокие концентрации Ni (99 vs 62 ppm) и менее дифференцированные REE ($La/Yb_n=3,3$ vs 6,7 в ср.). Наблюдаются небольшие или нулевые аномалии по Zr и Hf в обоих типах базальтов, но они в разной степени обогащены LREE. Содержание TiO_2 в переходных и обогащенных базальтах превышает 2,5 мас.%, а P_2O_5 , в среднем, существенно ниже, чем в последних. В целом, по сравнению с толеитовыми, базальты этих групп обогащены HFSE (Zr, Hf, Nb, Ta, Y), некоторыми LILE (K, Rb, Ba, Sr) и LREE. В обогащенных базальтах La_N составляет 125-141, $(La/Yb)_N = 4,2-9,1$.

Переходные базальты сильнее обеднены Th по отношению к La ($Th/La_n=0.22-0.89$) в сравнении с обогащенными базальтами ($Th/La_n=0.81-1.09$). Однако последние имеют более четко выраженные положительные аномалии Nb по отношению к Th и, в особенности, к La . На мультикомпонентных диаграммах редких элементов для переходных разностей пики La и Ce менее выражены и в области La, Nb и Th ($Nb/La_{pm}=1,19-1,57$ vs $1,2-1,4$). Похожие кривые распределения редких элементов характерны для многих фанерозойских переходных и щелочных базальтов океанических островов Тихого океана и протерозойских и архейских вулканических пород, которые интерпретируются, как OIB (Chen et al., 1991; Weaver, 1991; Stern et al., 1995; Polat et al., 1999) (рис. 3).

Первые геохимические данные по внутриплитным базальтам Уланбаторского комплекса (Центральная Монголия)

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 ($Nb/La_{pm}=1,1-1,3$; $Nb/Th_{pm}=1,2-1,3$). Возраст базальтов пока не ясен. По предварительным неопубликованным данным он может быть силурийско-девонским. Ассоциирующие с ними радиолариевые кремни сейчас исследуются японскими палеонтологами. Базальты с внутриплитными характеристиками позднепротерозойского возраста ранее были описаны в Джидинском комплексе, имеющим свое продолжение на территории России (Гордиенко и др., 2007). Данных о палеозойских базальтах плюмового типа в Монголии пока не было опубликовано. Поэтому проанализированные нами базальты из Уланбаторского АК надежно идентифицированы в Монголии впервые. В случае подтверждения силурийского возраста это будут первые из когда-либо описанных в литературе базальты OIB типа из «немного» интервала средний ордовик - средний девон (рис. 3).

Первые геохимические данные по комплексу Атбаши (Тянь-Шань)

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 вулканы. По соотношению кремнекислоты и щелочей породы представляют собой базальты нормального ряда абиссальной серии (Miyashiro, 1973). С точки зрения редкоэлементного состава они характеризуются плоскими и деплетированными в области LREE спектрами распределения редкоземельных элементов. Мультикомпонентные 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. 3). Для этого требуются дополнительные аналитические работы.

Геохимические данные по Хабаровскому комплексу (Приморье)

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, 2008) (рис. 3).

Новые геохимические данные по базальтам из комплекса Тамба-Мино (Центральная Япония)

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 спредингными (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 Палео-Азиатского океана, отмечается и для базальтов цепи симаунтов Акасака-Куцуу Палео-Пацифики (см. подраздел «Вариации химического состава внутриплитного магматизма») (рис. 3).

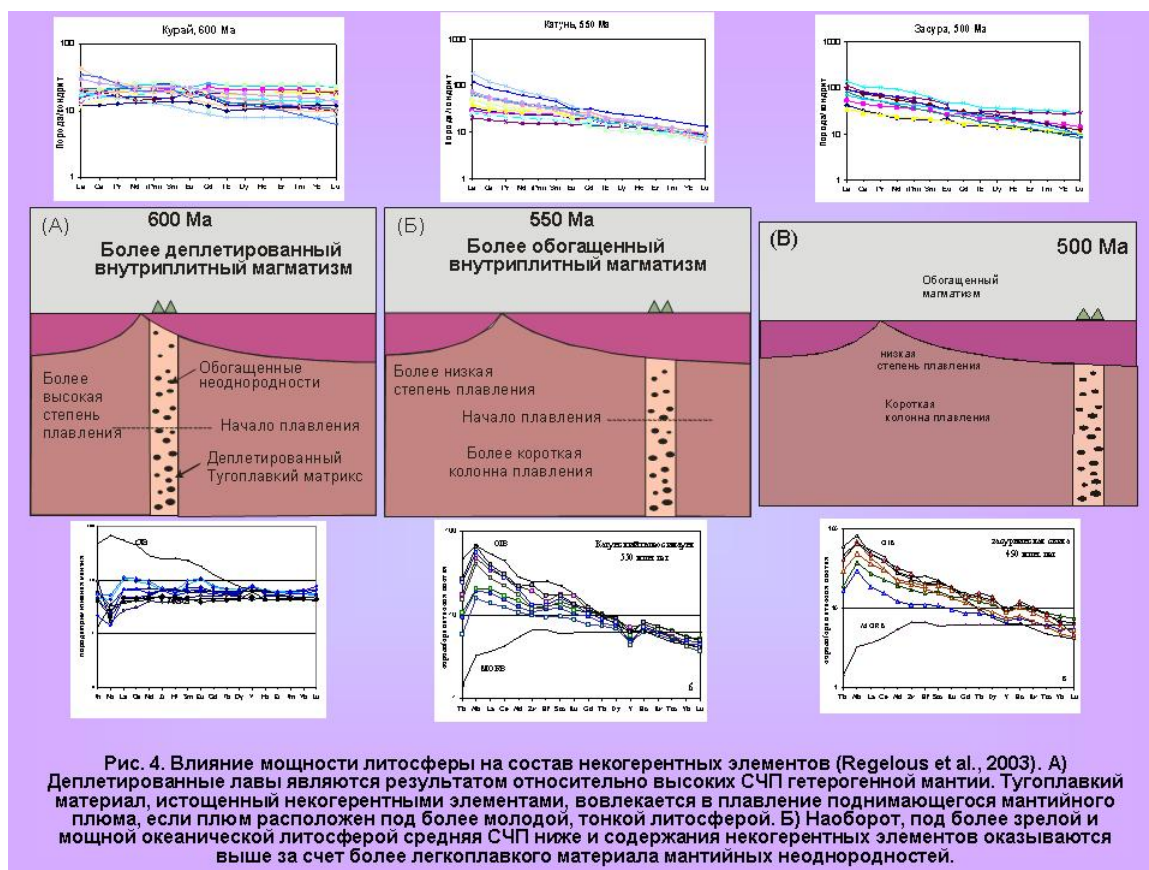
Вариации химического состава внутриплитного магматизма

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 TiO₂, LREE и более магнезиальны; для них характерны более низкие индикаторные отношения несовместимых элементов (Nb/La_{pm}, Nb/Th_{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 TiO₂ и LREE и более низкие #Mg. Засурьинские базальты имеют еще более высокие концентрации TiO₂ 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 ИГЦС (<42 млн. лет), Гавайские толеиты (< 2 млн. лет) и островов ЮЗ Пацифики [Garcia et al., 1986; Hemon 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 ИГЦС 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 разную степень 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 ($\#Mg_{cp}=53$; $TiO_{2cp}=1,6$; $La/Sm_{Ncp}=1,27$; $Nb/La_{pm\ cp}=0,66$); 2) базальты Катунского палеосимаунта Горного Алтая (550 млн. лет) менее магнезиальны и содержат больше некогерентных элементов ($\#Mg_{cp}=49$; $TiO_{2cp}=2,45$; $La/Sm_{Ncp}=1,95$; $Nb/La_{pm\ cp}=1,29$); 3) базальты засурьинской свиты (490 млн. лет) Чарыш-Теректинская зоны СЗ Алтая наиболее обогащены TiO_2 , LREE и MgO ($\#Mg_{cp}=43$; $TiO_{2cp}=2,8$; $La/Sm_{Ncp}=2,13$) и имеют редкоэлементный состав близкий к таковому для катунских лав ($Nb/La_{pm\ cp}=1,32$) (рис. 4).



На второй год работ по проекту запланировано моделирование такого рода для 1) карбонатных базальтов цепи симаунтов Акиоши-Савадани океанической плиты Фараллон Палео-Пацифики (Maruyama et al., 1997), входящих в состав аккреционного комплекса (АК) Акиоши-Сангун ЮЗ Японии; 2) пермских базальтов цепи симаунтов Акасака-Куцуу океанической плиты Изанаги Палео-Пацифики, входящих в состав аккреционного комплекса Мино-Тамба центральной Японии; 3) юрских базальтов Микабу-Сорачи входящих в состав аккреционного комплекса Санбагава-Чичибу ЮВ Японии. Для этого уже имеется достаточное количество аналитических данных. Планируется получить образцы из их дальневосточных аналогов: карбонатных базальтов Хабаровского АК, пермских базальтов Самаркинского АК и триасовых базальтов Таухинского АК Приморья. Их детальное геохимическое и изотопное изучение позволит проверить такой

петрологический подход на дальневосточных аналогах японских внутриплитных базальтов и включающих их аккреционных комплексах.

Новые данные по изотопному составу 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. 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.

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 абцисс 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.

Новые данные по составу вкрапленников клинопироксена и расплавных включений

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 свидетельствуют 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.

Для базальтов Катунского аккреционного комплекса был определен химический состав клинопироксена из крупнопорфирового базальта усть-семиной свиты, который соответствует $Wo_{38-42}En_{42-52}Fs_{0-12}$ для С-72ж-04 и $Wo_{34-41}En_{38-47}Fs_{1-12}$ для С-73а-04, где Wo – 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.

Анализ клинопироксенов Катунского палеосимаунта показал, что по соотношению TiO_2-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. 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. 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 SiO_2 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.

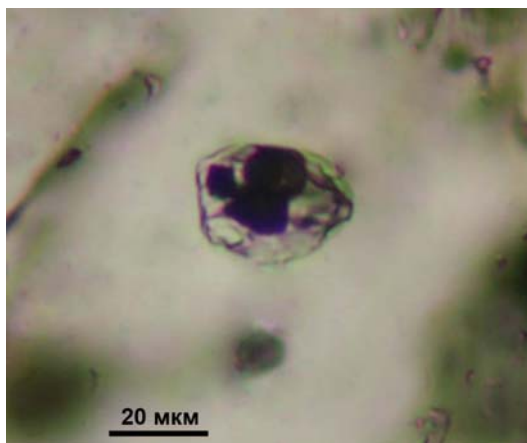


Рис. 5. Микровключение в образце базальта Катунского АК с твердой и флюидной фазами.

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 (плюмовые) базальты, которые раньше слагали

океанические острова, симаунты и плато, находятся в основании разреза океанической стратиграфии (ОС) (рис. 6).

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 (Opoie 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 вероятно 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.

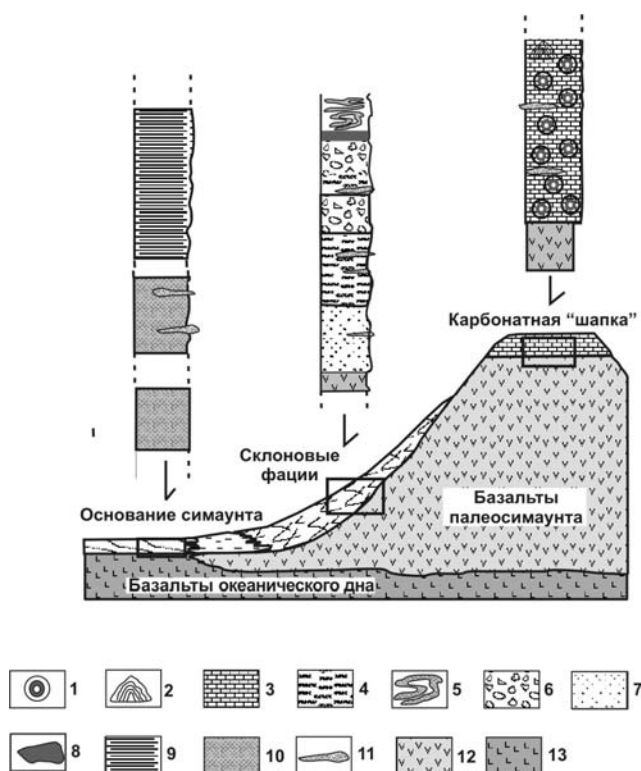


Рис. 6. Схематическая реконструкция строения палеосимаунта, перекрытого осадочными породами карбонатной «шапки» (1-3), склоновых фаций (4-8) и подошвы симаунта (9-10) (из [Isozaki et al., 1990] с изменениями). 1 – ооиды, 2 – строматолиты, 3 – массивные известняки, 4 – слоистый известковистый аргиллит, 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 вулканы (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. 4).

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. 7).

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

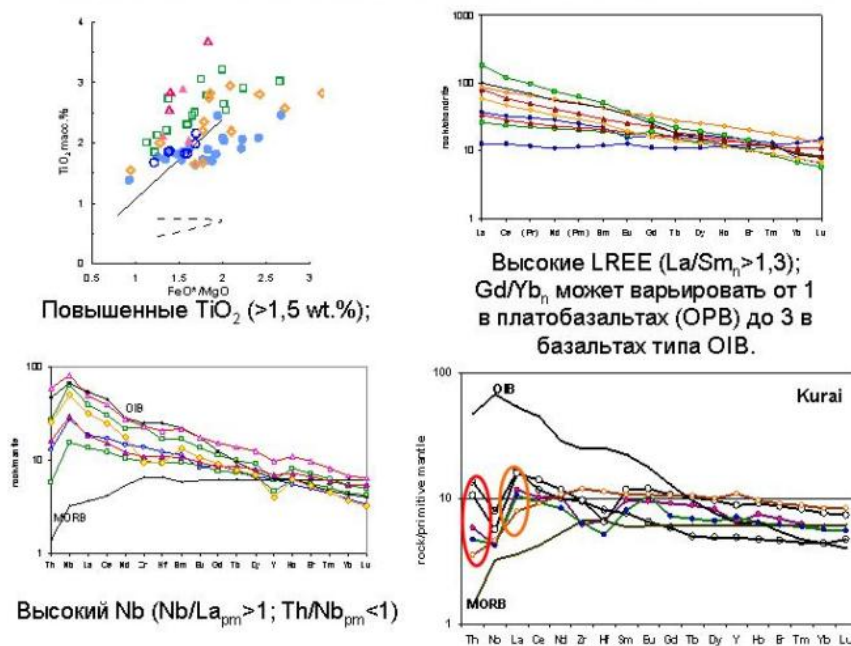


б



Рис. 7. Кремни (а) и обломочная карбонатная порода (б) с Z-складками

Рис. 8. Геохимические критерии выделения внутриплитных базальтов



Концентрации Nb в молодых симаунтах и 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. 8).

8. Разрезы ОС имеют структурное положение в покровно-надвиговых сооружениях аккреционных призм с участием 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.

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 аккрецированные океанические плато (Kerr et al., 2003). Среди докембрийских комплексов выделяются зеленокаменные пояса Австралийского (Komiyama 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 аккрецированные 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 ранне-среднепалеозойские 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 (N-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.].

Кроме того, 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.

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 (рис. 1, 2). 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. Поэтому проделанная участниками проекта огромная работа по сбору такой информации и составлению обобщенных разрезов и стратиграфических колонок, несомненно, имеет большое значение. Основные результаты этой работы уже прошли первый этап рецензирования для опубликования их в журнале *Ore Geology Reviews* и получили положительные отзывы. Сейчас статья находится в стадии корректировки.

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 и вовсе 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)ю 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 (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 элементов: 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 получают 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 (XFR) 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. Еще одна крупная партия образцов будет изучена этими же методами. Окончательной же целью проекта является составление единообразной базы геохимических данных по всем регионам проявления

океанического внутриплитного магматизма, которая будет доступна (в виде публикаций и/или в интернете) для мирового сообщества.

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, океанической литосферы на состав внутриплитных лав (Basu, Faggart, 1996; Diwu et al., 1993). Например, состав лав, изливавшихся над Гавайской горячей точкой, за 85 млн. лет изменился существенно (Regelous et al., 2003). Чаще всего геохимические вариации состава внутриплитных базальтов объясняют их излиянием на различном расстоянии от зоны спрединга и/или излиянием на океаническую литосферу разного возраста и, следовательно, разной мощности (Regelous, Hofmann, 1999; Regelous et al., 2003).

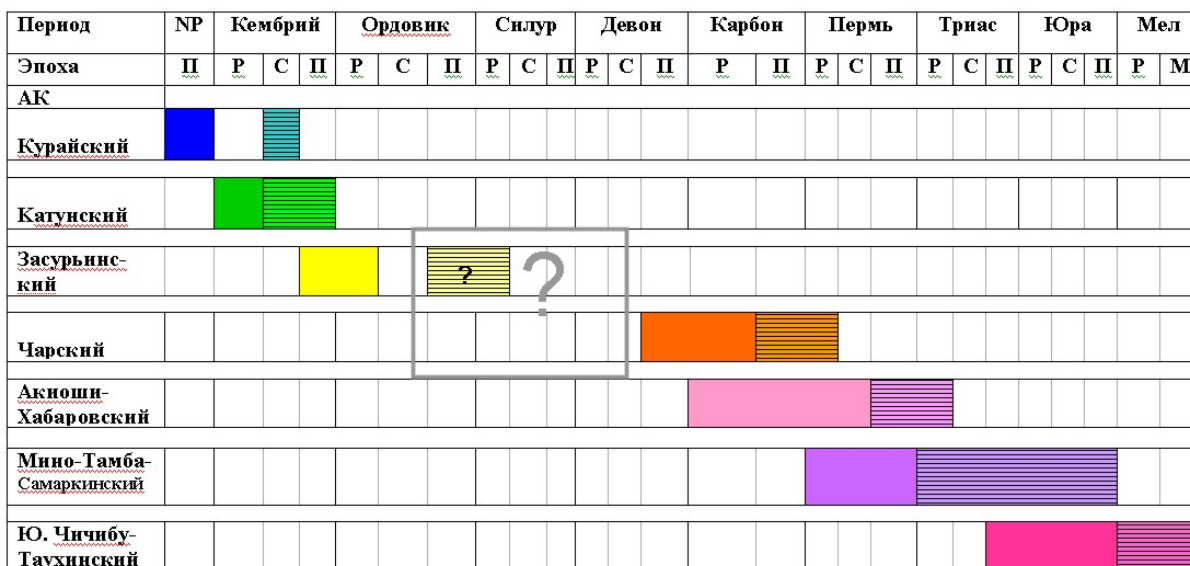
Разнообразие составов некогерентных элементов трех групп внутриплитных базальтов разного возраста (600, 550 и 490 млн. лет) можно объяснить различными степенями частичного плавления и смешением деплетированных и обогащенных расплавов. Под смешением мы подразумеваем участие в расплаве истощенного верхнемантийного 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. 8). 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; Komiya 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).

Периодичность океанического плюмового магматизма и среднеордовикская-среднедевонская пауза

На рис. 9 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) (Каппера 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 Тихоокеанским Суперплюмом (Maruyama et al., 2007). Тем не менее, существует «пробел» в проявлении внутриплитного океанического магматизма со среднего ордовика до среднего девона, 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. 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, 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). В связи с ограниченностью такой информации полученные нами первые результаты по Монголии имеют крайне важное значение. Открытие среднеордовикских-раннедевонских толщ океанической стратиграфии с внутриплитными базальтами могло бы подтвердить непрерывный характер внутриплитного магматизма Палеоазиатского океана и Палео-Пацифики. Если же таких объектов не будет обнаружено, то мы должны будем объяснить такую долгую, более 100 млн. лет, паузу.



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

Рис. 9.

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. По проекту предусмотрено моделирование такого рода для разновозрастных базальтов Палео-Пацифики (поздний карбон – ранняя Пермь - поздняя пермь).

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 (Komiya et al., 2002; 2004), не решают эту проблему. Поэтому нельзя переоценить значение полученных нами данных по минералогии и петрологии фенокристов 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»).

При проведении своих исследований участники проекта руководствовались самыми современными концепциями и методами изучения геодинамических обстановок формирования, мантийных источников, петрологии и постмагматических 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 высокопрецизионных 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; Komiya et al., 2002, 2004 и др.).

Таким образом, мировая практика изучения редкоэлементного и изотопного состава базальтов, минералогического изучения фенокристов и расплавных включений в них весьма обширна и позволяет проследить эволюцию океанического магматизма, а именно, состава исходных расплавов, RT-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 комплексному мульти-дисциплинарному подходу 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, изотопному и редкоземельному составу ассоциирующих карбонатов, составу летучих в расплавных включениях. Только такой подход позволит в итоге выяснить, существует ли связь между условиями плавления и составом исходных расплавов и количеством газов, выделяющихся при извержении, что, в свою очередь, даст нам возможность оценить степень воздействия извержений прошлого на окружающую среду в единицу геологического времени.