

На правах рукописи

САФОНОВА Инна Юрьевна

**ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕНД-
ПАЛЕОЗОЙСКИХ БАЗАЛЬТОВ ПАЛЕО-АЗИАТСКОГО ОКЕАНА ИЗ
СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ ГОРНОГО АЛТАЯ
И ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА**

25.00.03 – геотектоника и геодинамика
25.00.04 – петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК
2005

Работа выполнена в Институте геологии Сибирского отделения Российской Академии наук

Научный руководитель - доктор геолого-минералогических наук
Буслов Михаил Михайлович

Научный консультант - доктор геолого-минералогических наук
Симонов Владимир Александрович

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
Туркина Ольга Михайловна

кандидат геолого-минералогических наук
Беляев Сергей Юрьевич

Ведущая организация: Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

Защита диссертации состоится 23 декабря 2005 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.003.050.01 при Объединенном институте геологии, геофизики и минералогии им. А.А. Трофимука СО РАН, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3

Факс: (383) 333-27-92

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИГГМ СО РАН

Автореферат разослан « 18 » ноября _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к. г.-м. н.

Е.М. Высоцкий

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Алтае-Саянская складчатая область (АССО) и Восточный Казахстан являются аккреционно-коллизийными зонами, сформированными на окраине Сибирского континента в результате эволюции Палео-Азиатского океана. Они включают разнообразные фрагменты океанической коры, представленной вулканогенно-осадочными толщами, образованными в условиях океанического дна и океанических поднятий. Актуальность определения геодинамических обстановок формирования вулканогенно-осадочных толщ из аккреционно-коллизийных зон западной части АССО и Восточного Казахстана определяется необходимостью разработки единой геодинамической модели эволюции Палео-Азиатского океана и реконструкции этапов роста Сибирского континента. Использование комплекса геохимических и геологических данных при изучении вулканогенно-осадочных толщ нужно для проведения более надежных геодинамических реконструкций таких сложно построенных складчатых областей и сопоставления древних вулканических комплексов с подобными образованиями современных океанов.

Объектом исследования являются венд-раннекембрийские базальты Курайского и Катунского аккреционных клиньев (Горный Алтай), позднекембрийско-раннеордовикские базальты Чарыш-Теректинской сдвиговой зоны (северо-западный Алтай) и позднедевонско-раннекарбонные базальты Чарской сдвиговой зоны (Восточный Казахстан) на предмет выявления связи их петрохимического, геохимического и изотопного состава с геодинамическими обстановками формирования.

Цель работы: определение геодинамических обстановок формирования базальтов на основе комплексного анализа геологических и петролого-геохимических данных. **Задачи исследования:** 1) выделение геохимических типов, определение условий петрогенезиса и установление мантийных источников базальтовых расплавов; 2) выявление геодинамических условий формирования базальтов с применением геодинамического анализа и моделей мантийной конвекции.

Основные этапы исследования:

1. Детальное изучение закономерностей структурного положения и литологии вулканогенно-осадочных толщ.
2. Изучение петрохимических, геохимических и изотопных характеристик базальтов, оценка влияния процессов частичного плавления, фракционной кристаллизации, постмагматических изменений, метаморфизма и коровой контаминации на их состав.
3. Определение условий петрогенезиса и выделение типов мантийных источников базальтов на основе термобарогеохимических, геохимических и минералогических данных.
4. Геодинамический анализ обстановок формирования базальтов на основе совокупности структурных и литолого-стратиграфических данных, редкоэлементного состава пород, параметров петрогенезиса и типов мантийных источников.

Фактический материал и методы исследования. В основу работы положены материалы автора и других сотрудников Лаборатории геологической корреляции Института геологии (ИГ) ОИГГМ СО РАН, полученные в 1992-2004 гг., геолого-геохимические данные по Катунской зоне, любезно предоставленные А.Э. Изохом, термобарогеохимические и петрогенетические данные, полученные под руководством В.А. Симонова, данные интерактивной системы GEOROC, материалы геологических отчетов В.А. Зыбина и В.С. Куртигешева из ФГУП "Запсибгеолсъемка".

Теоретической основой решения поставленных задач является концепция тектоники литосферных плит, согласно которой базальты формируются в зонах спрединга океанических плит из деплетированных верхнемантийных источников и во внутриплитных областях океанов из обогащенных нижнемантийных источников в результате действия мантийных плюмов (горячих точек).

Использованные геологические схемы составлены М.М. Бусловым на основе детального картирования ключевых участков. Петролого-геохимические интерпретации опираются на петрографическое изучение базальтов (более 600 шлифов), оригинальные анализы пород на петрогенные (более 200 анализов) и редкие (около 150), в том числе редкоземельные элементы (около 100), выполненные методами INAA, XRF и ICP MS в Аналитическом центре ОИГГМ СО РАН и в Токийском институте технологий. Анализ изотопов Sm-Nd и Rb-Sr выполнен в ГЕОХИ РАН на масс-спектрометре TRITON (10 определений). Состав вкрапленников клинопироксена и

расплавных включений в нем - на микрозонде Camebax-Micro в ОИГТиМ СО РАН (>100 анализов) и ионном зонде IMS-4f в Институте микроэлектроники РАН (15 анализов). Температуры гомогенизации расплавных включений определялись в высокотемпературной термокамере с инертной средой (более 50 замеров) в ИГ ОИГТМ СО РАН.

Определение возраста базальтов Палео-Азиатского океана основано на палеонтологическом изучении ассоциирующих с ними кремнистых осадочных пород (данные Н.В. Сенникова и О.Т. Обут из ИГНГ СО РАН, К. Ивата из Университета Хоккайдо) и на датировании известняков, перекрывающих базальты, Pb-Pb методом (данные Ю. Учио из Токийского института технологий).

Основные защищаемые положения.

1. Венд-палеозойские базальты Палео-Азиатского океана из аккреционных и сдвиговых зон западной части АССО и Восточного Казахстана представлены деплетированными, переходными и обогащенными титаном, ниобием и редкоземельными элементами разновидностями. Деплетированные - схожи с базальтами океанического дна и ассоциируют с тонкослоистыми кремнистыми отложениями. Переходные и обогащенные - близки к внутриплитным базальтам Тихого океана и ассоциируют с терригенными карбонатно-кремнистыми отложениями склоновых фаций и известняками карбонатной "шапки" океанических поднятий.

2. Геохимические и изотопные характеристики пород свидетельствуют, что базальты океанического дна формировались из деплетированного верхнемантийного источника, а переходные и обогащенные базальты океанических поднятий – из гетерогенного мантийного источника при различных степенях частичного плавления.

3. На основании комплексного анализа геологических и петролого-геохимических данных обосновано формирование базальтов в геодинамических обстановках срединно-океанических хребтов, океанических островов и плато. Вулканизм горячих точек действовал в Палео-Азиатском океане в период с венда до раннего карбона.

Научная новизна. Личный вклад. На основании редкоэлементного состава впервые в палеоокеанических комплексах западной части АССО и Восточного Казахстана выделены три геохимические разновидности базальтов – деплетированные, переходные и обогащенные. На основе термобарогеохимических и минералогических исследований вкрапленников пироксена и расплавных включений в них определены температуры кристаллизации базальтов (1160-1250°С и 1100-1150°С). Впервые на основе петролого-геохимических и изотопных данных сделаны выводы о формировании переходных и обогащенных базальтов из гетерогенного мантийного источника, образованного при смешении деплетированных и обогащенных мантийных расплавов, при разных степенях частичного плавления. Установлено их формирование в геодинамических обстановках океанического дна, океанических островов и поднятий Палео-Азиатского океана. Выявлена связь переходных и обогащенных базальтов с деятельностью мантийных плюмов.

Теоретическая и практическая значимость результатов. Выявленные закономерности формирования базальтов Палео-Азиатского океана, входящих в состав аккреционно-коллизионных зон западной части АССО и Восточного Казахстана, могут быть использованы: 1) при геодинамических реконструкциях других складчатых областей Центральной Азии; 2) для совершенствования теоретических основ геодинамики палеоокеанов; 3) решения проблем межрегиональных корреляций; 4) составления геологических карт и стратиграфических схем; 5) прогнозирования полезных ископаемых, связанных с проявлениями океанического магматизма.

Апробация работы. Различные аспекты проведенных исследований обсуждались на российских и международных совещаниях и конференциях: XXXI совещании «Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты» (Москва, 1998); XXXII совещании «Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма» (Москва, 1999); Международном симпозиуме «Амальгамация докембрийских блоков и роль палеозойских орогенов в Азии» (Саппоро, 2002); 2-ом Всероссийском симпозиуме по вулканологии и палеовулканологии (Екатеринбург, 2003); XXXVII Тектоническом совещании «Эволюция тектонических процессов в истории Земли» (Новосибирск, 2004); Ассамблеях Европейского геологического союза (Ницца, 2003; Вена, 2005); 32-м Международном геологическом конгрессе (Флоренция, 2004); Международном семинаре IGCP-480 «Корреляция структурных и тектонических процессов Центрально-Азиатского складчатого пояса: рост континентов и внутриконтинентальные деформации» (Иркутск, 2005).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения (225 страниц) и содержит 73 рисунка и 22 таблицы. Библиография включает 198 наименований.

Благодарности. Работа выполнена под руководством д. г.-м. н. М.М. Буслова, которому автор выражает глубокую признательность за помощь при проведении научно-исследовательских работ и подготовке диссертации. Автор особенно признательна научному консультанту д. г.-м. н. В.А. Симонову за творческую помощь и моральную поддержку. За ознакомление с работой, сделанные замечания и предложения автор благодарит Н.А. Берзина, В.А. Кутолина и А.Э. Изоха. В ходе подготовки автор работы пользовалась советами сотрудников ОИГГМ СО РАН: Н.Л. Добрецова, И.В. Ащепкова, Н.И. Волковой, А.С. Гибшера, Д.А. Коха, Н.Н. Крука, Ю.Д. Литасова, О.Т. Обут, Н.В. Сенникова, которых благодарит за консультации и оказанную помощь. Автор глубоко признательна В.А. Боброву, Ф.В. Сухорукову, В.С. Пархоменко, А.Д. Кирееву, Ю.П. Колмогорову, С.В. Палесскому (ОИГГМ СО РАН) и Ю.А. Костицину (ГЕОХИ РАН) за полученные аналитические данные. За предоставленные материалы автор благодарит Ш. Маруяма, Ц. Ота и А. Уцуномия из Токийского института технологий. Особую признательность автор выражает В.И. Самойловой, Е.В. Солобоевой, Н.В. Друзяка и В.И. Данилевской за помощь в подготовке текста и оформлении работы.

Глава 1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ АККРЕЦИОННО-КОЛЛИЗИОННЫХ ЗОН ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АССО И ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Большинством исследователей (Дергунов А.Б., Зоненшайн Л.П., Гусев Н.И., Кунгурцев Л.В., Добрецов Н.Л., Берзин Н.А., Буслов М.М., Беляев С.Ю., Гибшер А.С., Изох А.Э. и др.) структура АССО и Восточного Казахстана рассматривается как аккреционно-коллизийная, сформированная на окраине Сибирского континента. В состав аккреционно-коллизийных зон включены фрагменты океанической коры Палео-Азиатского океана. В диссертации рассматриваются океанические базальты из аккреционных зон Горного Алтая и сдвиговых зон северо-западного Алтая и Восточного Казахстана, которые встречаются в составе ассоциаций пород океанического дна и океанических поднятий.

Горно-Алтайский регион включает Курайский и Катунский аккреционные клинья, формирование которых связано с венд-средне-кембрийским этапом субдукции океанической коры Палео-Азиатского океана и аккреции палеоокеанических островов к Кузнецко-Алтайской островной дуге. Чарыш-Теректинская зона сдвигов СЗ Алтая с базальтами засурынской свиты представляет собой позднедевонско-раннекарбонную зону сочленения Алтае-Монгольского микроконтинента с Сибирским континентом. Чарская зона сдвигов маркирует позднекарбонно-раннепермскую коллизийную структуру Казахстанского и Сибирского континентов, образованную при закрытии Обь-Зайсанской ветви Палео-Азиатского океана (рис. 1).

Курайский аккреционный клин южной части Горного Алтая состоит из трех структурных единиц (Buslov et al., 1993, 2002). Верхняя структурная единица представлена тектоническими платинами, сложенными олистостромами и отложениями океанического острова, включающими кремнисто-карбонатные брекчированные породы *склоновых фаций* с характерной конседиментационной Z-складчатостью и известняки «шапки» океанического острова с ооидами и строматолитами с возрастом 598 ± 25 млн. лет (Pb-Pb метод, Uchio et al., 2003) (рис. 2). Средняя структурная единица состоит из вулканогенной и карбонатной толщ, олистостром и метаморфических пород. Вулканогенная толща представлена базальтовыми лавами и дайками диабазов. Карбонатная толща сложена слоистыми и массивными известняками, глинистыми породами и песчаниками. Нижняя структурная единица представлена Чаган-Узунской офиолитовой меланжевой зоной, включающей пластины габбро-ультрамафитов, серпентинитовые сланцы с блоками эклогитов и гранатовых амфиболитов.

Базальты типа MORB представлены пиллоу-лавами и лаво-брекчиями и ассоциируют с зелено-серыми кремнистыми отложениями *океанического дна*, а подушечные и вариолитовые лавы палеоокеанического поднятия находятся в ассоциации с отложениями *склоновых фаций* и массивными известняками карбонатной «шапки» (Buslov et al., 1993, Dobretsov et al., 1995, 2004; Буслов, Сафонова, 2004; Safonova et al., 2004).

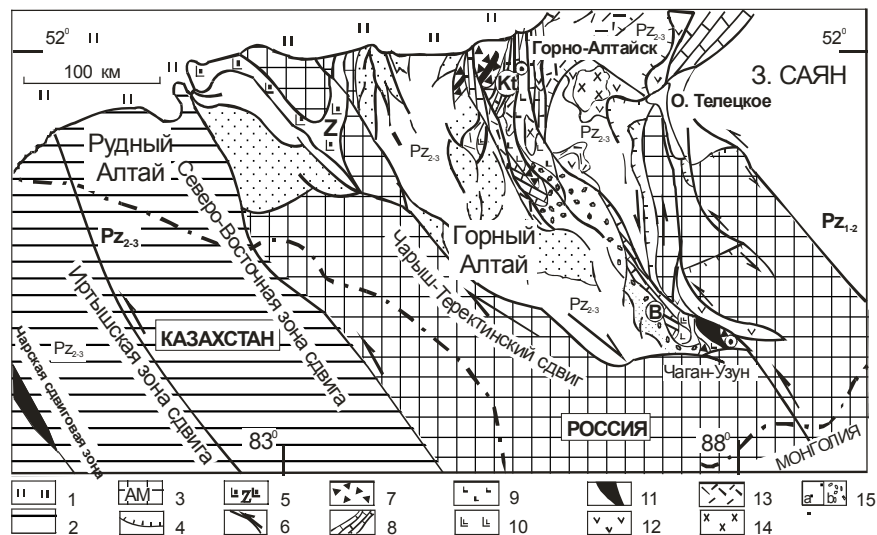


Рис. 1. Схема геологического строения западной части Алтае - Саянской области и Восточного Казахстана (Buslov et al., 2001). 1 – кайнозойский чехол, 2 – герциниды, 3 – Алтае-Монгольский микроконтинент, 4 – надвиги, 5 – океаническая кора E_3-O_1 (Z – засурьинская свита) Чарыш-Теректинской сдвиговой зоны; 6 – сдвиги; 7-11 – образования Курайского и Катунского аккреционных клиньев, E_1 (палеоокеанические поднятия: В – Баратальский, Kt – Катунский): 7 – олистостромы, 8-9 – образования палеоокеанических поднятий: 8 – карбонатная “шапка”, 9 – базальт-осадочная толща, 10 – базальты типа MORB, 11 – габбро-ультрамафиты; 12-15 – Кузнецко-Алтайская островная дуга (V- E_2): 12 – толеитово-бонинитовая серия примитивной стадии, V, 13 – известково-щелочная серия развитой стадии, $E_{1,2}$, 14 – габброиды, $E_{1,2}$, 15 – Ануй-Чуйский преддуговой прогиб, $E_{1,3}$ (а – флиш, b – олистостромы).

Катунский аккреционный клин северной части Горного Алтая состоит из нескольких тектонических пластин, в пределах которых наблюдаются стратиграфические взаимоотношения базальтов с осадочными породами (Гибшер и др., 1996; Добрецов и др., 2004; Буслов, Сафонова, 2004; Сафонова, 2004). Базальт-осадочные толщи представлены тремя группами пород, формировавшими ранее единый комплекс отложений палеоокеанического острова: 1) базальт-кремнисто-глинистое *основание острова*; 2) брекчированные карбонатно-кремнисто-глинисто-базальтовые *склоновые фации*; 3) массивная и слоистая карбонатно-туфовая *вершина* (“шапка”). Возраст пород второй группы надежно датируются микрофитолитами, известковыми водорослями и спикулами кремневых губок как раннекембрийский (Терлеев, 1991), а также по несогласно перекрывающим отложения аккреционного клина островодужным отложениям ранне-среднего кембрия с конгломератами в основании (Репина, Романенко, 1978).

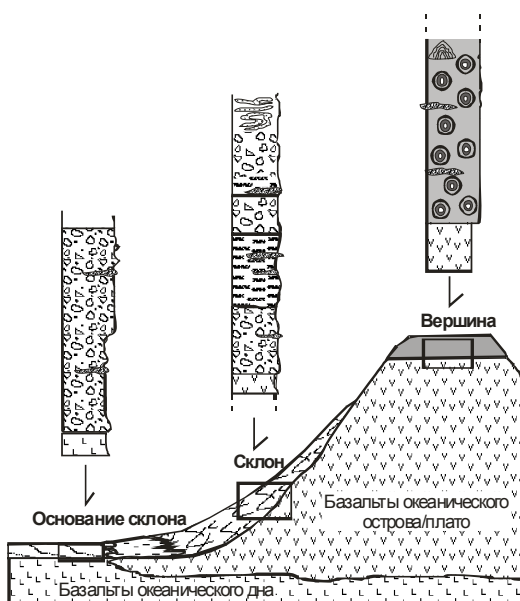


Рис. 2. Схематическая реконструкция строения Баратальского океанического острова Курайского аккреционного клина: *вершина* – карбонатная «шапка» (известняки со строматолитами, ооидами и кремнями); *склон* – переслаивание известняков, аргиллитов и кремнистых пород с Z-складками и брекчированных лав; *основание склона* – обломки аргиллитов, кремнистых пород, известняков, базальтов.

Чарыш-Теректинская сдвиговая зона состоит из деформированных фрагментов окраинных частей Алтае-Монгольского микро-континента и Сибирского континента и океанической коры Палео-Азиатского океана (Buslov, Safonova et al., 2001). Океанические базальты обнаружены в составе засурьинской свиты, которая представлена тектоническими чешуями, сложенными пестроцветными песчаниками, кремнистыми породами, пиллоу-лавами базальтов, их туфами, силлами и дайками габбро-диабазов. Базальты ассоциируют с темно-красными и серо-зелеными кремнистыми породами, которые содержат конодонты и радиолярии позднего кембрия - раннего ордовика (Iwata et al., 1997; Сенников и др., 2003). В прослоях крупнозернистых песчаников встречаются обломки исключительно кремнисто-глинистых пород, кремнистых отложений, базальтов и туфов. Брекчированность и Z-образная складчатость пород в некоторых тектонических пластинах предполагает их отложение на *склонах океанического острова* (Буслов, Сафонова и др., 1999).

Чарская сдвиговая зона является главным элементом геологической структуры Восточного Казахстана, в пределах которой наиболее изученным является Чарский офиолитовый пояс. В Чарской зоне выделяются тектонические единицы различного строения, возраста и геодинамического происхождения: 1) субдукционный меланж с блоками O_3-S_1 HP метаморфических пород и вулканогенно-кремнистых пород с остатками радиолярий и конодонтов D_2-C_1 , (Iwata et al., 1994, 1997); 2) ордовикские офиолиты с чешуями пород океанической коры, структурно связанные с прослоями кремнистых алевролитов и яшмоидов с радиоляриями и конодонтами D_2-C_1 (Сенников и др., 2003); 3) полимиктовый меланж C_2-P_1 с фрагментами субдукционного меланжа и офиолитов. Чарские базальты ассоциируют с массивными известняками и кремнистыми отложениями склоновых фаций с конодонтами, что предполагает мелководную океаническую обстановку их излияния в условиях океанического поднятия.

Глава 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВ

Для геохимического изучения образцы отбирались из наименее измененных базальтовых потоков. Для проверки достоверности полученных аналитических данных редкие элементы и REE были проанализированы несколькими методами. Сравнение результатов, полученных XRF по одним и тем же образцам, но в разных лабораториях, показало наибольшее расхождение по содержаниям Nb и Y. Сравнение данных INAA с XRF и ICP MS показало, что наименьшая ошибка отмечена для ICP MS и составляет $\pm 10\%$ для редкоземельных элементов (REE) и $\pm 15\%$ для остальных элементов.

При изучении петрогенезиса и геодинамических условий формирования базальтов использовалось разделение редких элементов на *совместимые и несовместимые*, которые не концентрируются в минералах, а остаются в расплаве. Для базальтов типично несовместимыми являются Th, Nb, Zr, Rb, Ba и LREE (Склярков и др., 2001). Геохимические интерпретации основывались на зависимости содержания главных и редких элементов в расплаве от состава и степени плавления мантийного источника с учетом возможного изменения состава океанических базальтов при выветривании, гидротермальной переработке в условиях морского дна и метаморфизме (Bottrell et al., 1990; Stakes, O'Neil, 1982).

С точки зрения подвижности элементов большинство исследователей согласны, что в древних базальтовых сериях Al, HFSE (высоко заряженные элементы), REE, Y устойчивы в постмагматических процессах, тогда как LILE (крупноионные литофильные элементы) и Na, Ca, Fe - более подвижны (Ludden et al., 1982; Bienvenu et al., 1990; White et al., 1999 и др.). Критериями оценки подвижности элементов в океанических вулканических породах являются данные полевых наблюдений (сохранение первичных вулканических структур, минимальная деформация пород, отсутствие признаков гидротермальных процессов), петрографических (сохранение первичных магматических минералов) и геохимических (низкие п.п.п., корреляции MgO с другими породообразующими элементами, ровные спектры REE и пр.) характеристики (Kerrick and Wuyuan, 1997). По всей совокупности критериев изучаемые базальты рассматриваются как измененные в умеренной степени.

Наряду с традиционным петрохимическим разделением базальтов на толеитовые, субщелочные и щелочные, автор использовала выделение деплетированных, переходных и обогащенных геохимических групп базальтов, различающихся по содержанию неподвижных при вторичных процессах компонентов - TiO_2 , LREE и Nb.

Геодинамические интерпретации базируются на идее о химически неоднородной мантии, состоящей из верхнего истощенного и нижнего неистощенного слоев, и разнообразии составов океанических базальтов, как результата рециклинга (обращения) в мантию материала океанической и континентальной коры в ходе субдукции. Формирование океанических поднятий связано с действием стационарной «горячей точки» (плюма), расположенной под движущейся литосферной плитой (Wilson, 1963; Morgan, 1971).

Отношения *радиогенных изотопов* использовались как источник информации о составе плавившегося источника и для оценки смешения магм и коровой контаминации. А. Zindler и S.R. Hart (1986) выделили пять конечных компонентов мантийных резервуаров океанических базальтов: BSE, DMM, HIMU, EM1, EM2. Впоследствии, с накоплением изотопных данных по современным базальтам из всех регионов мира, стало ясно, что существует большее число конечных компонентов. Д.В. Рундквистом и др. (2000) выделено 5 групп базальтов, образованных при смешении вновь выделенного общего компонента F и уже известных компонентов DM, EM1, EM2 и HIMU, и предположено, что компонент F характеризует некий усредненный состав мантии, расположенной ниже деплетированного слоя.

Геодинамические условия формирования базальтов определялись с помощью дискриминационных диаграмм (Скляров и др., 2001), основанных на наименее подвижных элементах, путем анализа спектров REE и мульти-компонентных диаграмм элементов-примесей (Polat et al., 1999) с использованием данных по геодинамическим типам магматических пород океана (Фролова, Бурикова, 1997; Дмитриев, Соколов, 2003; GEOROC).

Для определения условий петрогенезиса базальтов использовались данные о химическом составе вкрапленников клинопироксена в виде диаграммы Эн-Ди-Гед-Ферр (Lindsley, 1983), двойных диаграмм Al – Ti, #Mg–Ti/Alб#Mg–Al, #Mg–Ti, #Mg–Na, спектров REE и данные по температурам гомогенизации расплавных включений.

Глава 3. ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ И ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЗАЛЬТОВ

Венд-раннекембрийские базальты Курайского аккреционного клина по соотношению суммы щелочей и SiO₂ породы являются базальтами и трахибазальтами, по Nb/Y и SiO₂ (Winchester, Floyd, 1977) - нормальными базальтами, а по Al₂O₃-TiO₂+FeO-MgO - высоко-Fe толеитовыми базальтами. Содержания SiO₂=44-52; Fe₂O₃=7,5-14,9; TiO₂=0,43-2,42; P₂O₅=0,08-0,58 мас.%; Mg#=66-36, п.п.п. >2 мас.%.

На основе распределения HFSE, LILE, REE и отношений Zr/Nb изученные базальты были разделены на три группы.

1) *Деплетированные* базальты с геохимическими характеристиками типа N-MORB, т.е. обедненные LILE и HFSE; La_N=1,9-3,2; La/Yb_N=0,53-0,87; La/Sm_N=0,57-0,89; Gd/Yb_N=0,9-1,08; Zr/Nb=65.

2) Доминирующие *переходные* базальты, близкие к океаническим платобазальтам (OPB), с Zr/Nb=35, плоскими спектрами REE, похожими на таковые для платобазальтов Науру и Онтонг-Джава (Safonova et al., 2004), La_N=4,5-8; La/Yb_N=0,74-2,37; La/Sm_N=0,7-1,63; Gd/Yb_N=0,92-1,56.

3) *Обогащенные* базальты, схожие с базальтами океанических островов (OIB) с повышенными LILE, LREE, Ti, Nb (Zr/Nb =26); La_N=11-16; La/Yb_N=3,5-4,4; La/Sm_N=2,1-2,2; Gd/Yb_N=1,3-1,5 (рис. 3а).

Все мульти-компонентные диаграммы редких элементов, нормированные по примитивной мантии, похожи друг на друга и характеризуются обеднением Nb и Th относительно LREE (Nb/La_{pm}=0,3-0,75; Th/La_{pm}=0,3-0,9).

Расплавные включения в клинопироксенах из обогащенного базальта характеризуются FeO*/MgO=0,9-2,2; K₂O=0,07-0,18; TiO₂=1,1-2,3 мас.%, высоким Cr, низкими Sr и Th, Nb/La_{pm}=0,56-0,72; Th/La_{pm}=0,28-0,33; Zr/Nb=41,2, уплощенными спектрами REE (La_N= 11,5-18,5; La/Sm_N=0,46-0,59; Gd/Yb_N=1,95-2,06), также похожими на таковые для платобазальтов бассейна Науру и плато Онтонг Джавы. По данным ионного зонда содержания воды в них (0,068-0,294 мас. %) близки к таковым в стеклах и расплавных включениях базальтов бассейна Науру (Симонов и др., 2004). Эксперименты в микротермокамере показали, что включения становятся гомогенными при 1160-1190°C.

Химический состав вкрапленников клинопироксена соответствует $Bo_{37,4-43,3}En_{46,1-49,2}Fs_{8,7-13,6}$. Температуры кристаллизации, рассчитанные с помощью программы И.В. Ащепкова по

пироксеновым термометрам (Mercier, 1981; Nimis, Taylor, 2000) при 1 и 2 кбар, составляют, соответственно, 1005-1120°C и 1100-1205°C. По соотношению Ti/Al - #Mg клинопироксены схожи с высоко-Mg пироксенами (#Mg=77-84) из древних и современных базальтов океанических островов (Komiyu et al., 2002) и характеризуются $La_N=0,8-2$; $La/Yb_N=0,1$; $La/Sm_N=0,09-0,13$.

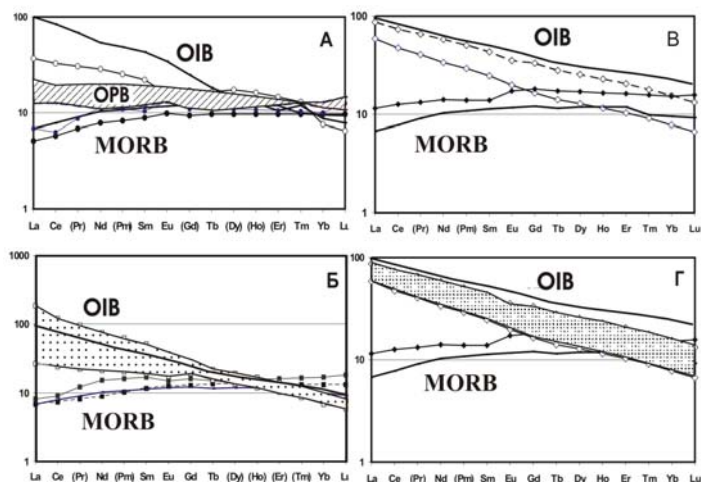


Рис. 3. Нормированные по хондриту спектры REE базальтов из Курайской (А), Катунской (Б), Чарыш-Теректинской (В) и Чарской (Г) зон. Базальты: MORB – срединно-океанических хребтов (сплошная линия внизу), OIB – океанических островов (сплошная линия сверху), OPB – океанические платобазальты.

Раннекембрийские базальты Катунского аккреционного клина по содержанию TiO_2 , LREE и Nb представлены деплетированными и обогащенными разностями. По соотношению Nb/Y и SiO_2 они соответствуют щелочным и нормальным базальтам, а по $Al_2O_3-TiO_2+FeO-MgO$ - высоко-Fe толеитовым базальтам.

В деплетированной группе $SiO_2=45,1-52,6$; $Fe_2O_3=7,2-14,5$; $TiO_2=0,86-1,52$; $Al_2O_3=12,7-20,6$; $P_2O_5=0,1-0,66$ мас.%; $Mg\#=33-64$; $Zr/Nb=19-84$. Спектры REE деплетированы LREE ($La_{Ncp}=3,9$; $La/Sm_N=0,5-1,3$; $La/Yb_N=0,5-2,1$); характерны низкие Nb/ La_{pm} (0,16-0,96), Nb/ Th_{pm} (0,24-0,69) и Th (0,2-0,6 ppm). Породы близки по составу к N-MORB.

В обогащенной группе $SiO_2=43,6-52,3$; $Fe_2O_3=9,4-15,5$; $TiO_2=1,4-2,9$; $P_2O_5=0,14-0,72$ мас.%; $Mg\#=39,5-60,8$; $Zr/Nb=3-6$. Спектры REE обогащены LREE: $La_{Ncp}=52,8$; $La/Yb_N=2,16-8,54$; $La/Sm_N=1,3-3,65$; $Gd/Yb_N=1,4-3,4$. Nb максимум относительно La и Th ($Nb/La_{pm}=1,23-2,87$; $Nb/Th_{pm}=1,85-4,75$) свидетельствует об их близости к базальтам океанических островов (рис. 3б).

Позднекембрийско-раннеордовикские базальты засурьинской свиты Чарыш-Теректинской сдвиговой зоны представлены по соотношению Nb/Y и SiO_2 толеитовыми, переходными и щелочными базальты, по $Al_2O_3-TiO_2+FeO-MgO$ - высоко-Fe толеитовым базальтами, по редкоэлементному составу (LREE, Nb, Ti) - деплетированными, переходными и обогащенными разностями.

Деплетированные базальты характеризуются низкими значениями K_2O , TiO_2 и P_2O_5 . Содержания MgO, CaO, Al_2O_3 и SiO_2 близки к таковым для океанических толеитов: $SiO_2=48-55$, а $Fe_2O_3=10-15$ мас.%, $Mg\#=63-50$, $Ni=56-78$ ppm. Породы обеднены LREE ($La_N=2-12$, $La/Yb_N=0,8-1,2$; $La/Sm_N=0,6-1,0$; $Gd/Yb_N=1,1-1,3$), Nb и Th по отношению к La ($Nb/La_N < 1$), т.е. являются аналогами толеитов MORB (Фролова, Бурикова, 1997).

Базальты переходной и обогащенной групп обогащены Hf, Nb, Ta, Y, K, Rb, Ba, Sr и LREE, $Zr/Y=3,9-7,8$ (2,5-2,8 для толеитов), $Al_2O_3/TiO_2=6$ (9 для толеитовых базальтов). Переходные - имеют менее дифференцированные REE ($La/Yb_N=3,3$) и более низкие P_2O_5 и Th по сравнению с обогащенными, в которых $La_N=125-141$; $La/Sm_N=1,9-8$; $La/Yb_N=4,2-9,1$; и максимумы по Nb ($Nb/La_{pm}=1,2-1,6$), более четкие, чем для переходных ($Nb/La_{pm}=1,2-1,4$) (рис. 3в).

Позднедевонско-раннекарбоновые базальты Чарской сдвиговой зоны по соотношению Nb/Y и SiO_2 породы соответствуют щелочным и субщелочным базальтам, по $Al_2O_3-TiO_2+FeO-MgO$ - высоко-Fe толеитовым базальтам и андезитобазальтам. По содержанию LREE ($La < 6$ и > 13 , $La/Sm_N < 0,8$ и $> 1,5$) базальты Чарской зоны были разделены на деплетированные и обогащенные.

В деплетированной группе $SiO_2=46,1-49,3$; $Fe_2O_3=13,5-15,2$; $TiO_2=1,6-2,45$; $P_2O_5=0,13-0,25$; $Al_2O_3=12,4-13,1$ мас.%, $Mg\#=48,2-55,8$; $Zr/Nb=37-48$. В базальтах этой группы низкие Ta, Th, Hf,

LREE, P_2O_5 , минимумы по Nb ($Nb/La_{pm}=0,16-0,96$; $Nb/Th_{pm}=0,24-0,69$), деплетированные спектры REE ($La_{Ncp}=13$; $La/Sm_N=0,5-0,8$; $La/Yb_N=0,54-0,75$), т.е. близки к N-MORB (рис. 3г).

Обогащенные базальты содержат $SiO_2=45-52,8$; $Fe_2O_3=7,8-13$; $TiO_2=1,5-2,7$; $P_2O_5=0,25-0,84$; $Al_2O_3=15-17,7$ мас.%; $Mg\#=29,8-58,6$; $Zr/Nb=4-25$. Породы близки по составу к OIB, т.е. характеризуются повышенными LREE и HFSE ($La_{Ncp}=54,8$; $La/Yb_N=1,8-8,3$; $La/Sm_N=1,4-2,97$; $Gd/Yb_N=1,47-2,74$) и $Nb/La_{pm}=1,2-1,9$; $Nb/Th_{pm}=1,3-3$.

По *изотопному составу* Sm, Nd, Rb, Sr разброс значений ϵ_{Nd} для всех типов базальтов составляет от +5,2 до +8,1, что совпадает с таковыми, характерными для ранне-среднепалеозойских магматических пород всей АССО (Ярмолюк, Коваленко, 2003). Самые высокие значения ϵ_{Nd} в вендских базальтах Курайская зоны (от +7,8 до +8,1) связаны с участием в их образовании деплетированной мантии. В целом более обогащенные некогерентными элементами разности имеют более низкие ϵ_{Nd} . Образцы с $Nb/La > 1$ близки к мантийному тренду, что предполагает их плавление из обогащенного источника ($\epsilon_{Nd}=+6,5$).

Заметное обогащение ^{87}Sr ($^{87}Sr/^{86}Sr$ до 0,7179) рассматривается как результат постмагматических изменений базальтов, что подтверждается данными по $^{87}Sr/^{86}Sr$ для палеозойских вулканитов АССО и измененных платобазальтов Аруба (Ярмолюк, Коваленко, 2003; White et al., 1999). Так как нет прямой корреляции между величиной изотопных отношений $^{143}Nd/^{144}Nd$ и обогащением LREE, можно предположить, что обогащение источника произошло незадолго до выплавления из него базальтового расплава.

Глава 4. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ, МАНТИЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ И ПЕТРОГЕНЕЗИС БАЗАЛЬТОВ

Надежные геодинамические интерпретации должны основываться как на литолого-стратиграфических, так и на геохимических данных. Первичные взаимоотношения осадочных пород и базальтов океанического острова реконструируются в Курайской и Катунской зонах (Добрецов и др., 2004; Uchio et al., 2004). В Чарыш-Теректинской и Чарской сдвиговых зонах базальты в ассоциации с отложениями склоновых фаций и океаническими осадками сохранились лишь в составе маломощных тектонических пластин (Buslov et al., 2001; Сеников и др., 2003). При использовании геохимических данных предварительно оценивалось влияние постмагматических изменений, контаминации, фракционной кристаллизации и степени частичного плавления (*СЧП*) на состав базальтов.

Низкая *подвижность* SiO_2 , MgO, FeO и TiO_2 , REE и HFSE при гидротермальных изменениях и метаморфизме подтверждается в изученных базальтах: 1) отсутствием заметного обогащения/истощения определенных групп элементов в зависимости от п.п.п.; 2) наличием зависимости между Sm и Nb, La, Zr, Yb, Ti, что, в целом, характерно для океанических толеитовых базальтов (Polat et al., 1999); 3) схожестью спектров REE и мульти-компонентных диаграмм в пределах каждой группы базальтов; 4) отсутствием корреляций между отношениями Th/Nb и Nb/La и п.п.п, CIA и Eu/Eu и другими признаками. Похожие выводы об относительной малоподвижности Al, HFSE и REE в древних вулканических породах были сделаны и другими исследователями (Добрецов и др. 1992; Симонов и др., 1994; Komiya et al., 2004).

С точки зрения *контаминации* материалом континентальной коры считается, что рассматриваемые базальтовые толщи образовались в океанической обстановке (Берзин и др., 1994; Гусев, 1991; Гибшер и др., 1997; Добрецов и др., 1992; Симонов и др., 1994; Buslov et al., 1993, 2001). Несмотря на то, что в деплетированных базальтах $Nb/La_{pm} < 1$, коровая контаминация маловероятна из-за низких содержаний Th и отсутствия корреляций между Nb/La_{pm} и Th/La_{pm} , SiO_2 , MgO, и LREE.

По результатам изотопных исследований допустима контаминация расплавом изотопов Sr морской воды, т.к. значения отношений $^{87}Sr/^{86}Sr$ в большинстве образцов (0,7045÷0,7078) выше, чем в неизмененных MORB (0,7023÷0,7031) и в примитивной мантии (0,7045) (Покровский, 2000).

Отсутствие заметного *фракционирования* LREE в ходе фракционной кристаллизации подтверждается узкими вариациями La/Sm_n при значительных вариациях Mg# и отсутствием корреляций между La/Sm_n и #Mg, TiO_2 , Fe_2O_3 . Поэтому межэлементные отношения Th-Nb-LREE в изученных вулканитах принимаются, как независимые от фракционирования оливина, пироксена, плагиоклаза и Fe-Ti оксидов.

Различный состав порообразующих и некогерентных элементов в базальтах предполагает различные *СЧП* и глубины плавления: высокие на уровне шпинелевой фации для

деплементированных и переходных базальтов ($Gd/Yb_n < 1,5$; $Mg\#_{cp} = 53$) и низкие на уровне гранатовой фации ($Gd/Yb_n > 2$; $Mg\#_{cp} = 41$) для большинства обогащенных базальтов (Hirschmann, Stolper, 1996) (рис. 5).

В системе Th-Nb-Ce мантийные источники океанических базальтов описываются через смешение деплементированного (DMM; высокие Ce/Nb, низкие Th/Nb), рециклированного (RSC; материал океанической коры, дегидратированный в зоне субдукции, с низкими Th/Nb, Ce/Nb) и субдукционного (SDC; высокие Ce/Nb, Th/Nb) компонентов (Saunders et al., 1988). Несмотря на высокие Ce/Nb ($Nb/La_{pm} < 1$) в переходных и деплементированных базальтах наличие в источнике компонента SDC маловероятно, т.к. $Th/Nb_{pm} < Nb/La_{pm}$ (Weaver, 1991). Скорее всего, имело место, в основном, смешение компонентов DMM и RSC. Обогащенные базальты характеризуются $Nb/La_{pm} > 1$, что предполагает участие в плюмовом расплаве компонента RSC (рис. 4).

Температуры кристаллизации клинопироксена (1005-1120°C и 1100-1205°C) и температуры образования курайских базальтовых расплавов (1160-1250°C) соответствуют таковым для плато Науру (Симонов и др., 2004).

Реконструкция геодинамических обстановок формирования магматических пород проводилась на основе геологических данных, геохимических критериев и дискриминационных диаграмм, результаты использования которых приведены в таблице. Тем не менее, такие диаграммы не всегда позволяют однозначно решить вопрос об обстановке формирования базальтов (Великославинский, 1997 и др.). В таблице использованные критерии приведены в совокупности и показывают, что базальты формировались в обстановках океанического дна и океанических островов и поднятий.

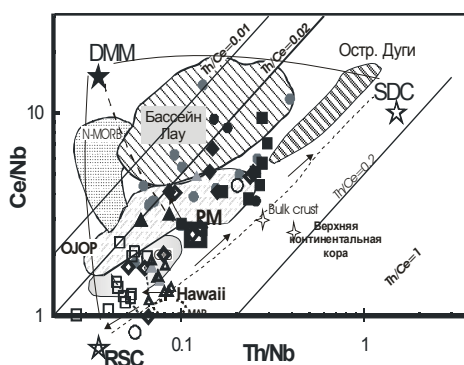


Рис. 4. Диаграмма Ce/Nb - Th/Nb по (Saunders et al., 1988). Сплошными линиями показано смешение компонентов DMM, RSC и SDC (см. текст); пунктиром - отделение расплава и образование DMM, RSC и SDC. Поле для Гавайских островов построено автором по данным базы данных GEOROC. Зоны: • – Курайская, ■ – Катунская, ▲ – засурьинская свита, ◆ – Чарская. Пустые символы – обогащенные базальты.

Впервые на основе геохимических данных обосновано выделение базальтов океанического плато в Курайской зоне. По геохимическим критериям базальты имеют плоские спектры LREE, Ni/Co и Cr/V ниже, а P_2O_5/TiO_2 , Th/Ta и Rb/Sr выше, чем в N-MORB, $Nb/La_{pm} < 1$ (Kerr et al., 2000; Фролова, Бурикова, 2002). Геологические данные – ассоциация с отложениями и склоновых фаций, и мощной (до 500 м) протяженной (более 50 км) толщи карбонатной «шапки», а также пространственная связь с обогащенными разновидностями (высокие LREE, $Nb/La_{pm} > 1$) предполагает их образование в условиях океанического поднятия, комбинирующего океанический остров и океаническое плато, что ранее было описано для плато Онтонг-Джава (Neal et al., 1997). Существование в Палео-Азиатском океане океанических плато подтверждается результатами изучения Джидинской зоны Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) и входящего в ее состав одноименного океанического гайота (Кузьмин и др., 1995; Gordienko, Filimonov, 2005).

Причиной широких вариаций степени обогащения некогерентными элементами внутриплитных базальтов может быть смешение расплавов гетерогенной мантии, состоящей из деплементированного тугоплавкого матрикса и обогащенных легкоплавких неоднородностей, под воздействием мантийного плюма, что, в свою очередь, связано с различной мощностью перекрывающей литосферы (Ellam, 1992). Возможность существования гетерогенной мантии обосновывается и изотопными данными (Титаева, 2001). В ходе плавления такой мантии при тонкой литосфере и высоких СЧП образующиеся расплавы будут иметь более истощенный состав за счет тугоплавкого деплементированного материала (Ph. Morgan, 1999). При увеличении мощности литосферы СЧП снижается, и расплав обогащается легкоплавкими компонентами мантийных неоднородностей.

Если предположить, что мощность океанической литосферы в венде была меньше, чем в начале кембрия, то более высокие СЧП объясняют низкие концентрации некогерентных элементов в курайских базальтах по сравнению с катунскими. В современной обстановке такие изменения

составов наблюдаются для Императорско-Гавайской цепи океанических поднятий (Regelous et al., 2003). Более низкие La/Sm и более высокие Lu/Hf отношения в курайских базальтах подтверждают их формирование при относительно высоких СЧП в пределах поля устойчивости шпинели (рис. 5).

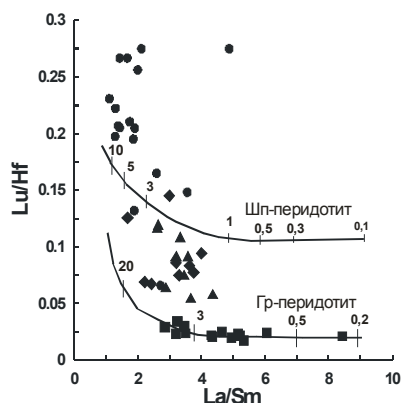


Рис. 5. Эффект частичного плавления шпинелевого и гранатового перидотита от 0,01 до 20% (Regelous et al., 2003). Пунктирное поле – MORB (Niu et al., 1999). Обозначения см. рис. 4.

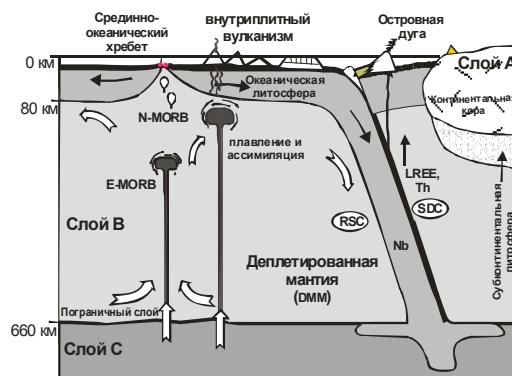


Рис. 6. Принципиальная геодинамическая модель формирования океанических базальтов Палеоазиатского океана. Символы см. рис. 3, 4, стр. 14, табл.

Таблица

Геодинамические обстановки формирования базальтов АССО и Восточного Казахстана по геохимическим и геологическим критериям

	La/Sm _n	Nb/La _{pm}	Zr-Nb-Y (1)	Th-Hf-Ta (2)	геологические ассоциации	ВЫВОДЫ
Курайские						
1) деплет-е	0,6-0,9	0,62	MORB IAB	MORB IAB, IAT	Кремнистые отложения	MORB
2) переходные	0,7-1,6	0,56	MORB IAB	MORB	отложения склоновых фаций, карбонатной шапки	OPB, OIB
3) обогащенные	2,2	0,7	MORB WPT	IAB		
Катунские						
1) деплетированные низко-Ti	1,6-1,6	0,47	MORB IAB	MORB	кремнистые породы, спикюлы губок	MORB
2) обогащенные высоко-Ti	1,3-3,6	1,5	WPT WPAB	WPT WPAB	карбон.-терриг. отложения склоновых фаций	OIB
Чарышские						
1) деплетированные	0,6-1,0	0,65	MORB IAB	MORB IAT	глубоководные отложения с радиоляриями	MORB
2) переходные	1,7-2,1	1,3	MORB WPB	MORB	отложения склоновых фаций, кремни с конодонтами	OIB
3) обогащенные	1,9-2,8	1,35	WPAB	WPT WPAB		
Чарские						
1) деплетированные	0,5-0,8	0,6	MORB IAB	MORB IAT	глубоководные кремнистые аргиллиты с радиоляриями	MORB
2) обогащенные	1,4-2,9	1,4	WPT, WPB	WPT WPAB	склоновые отложения с конодонтами	OIB
базальты Онтонг-Ява, Науру	1,0	1,0	MORB IAB	MORB WPT	современные обстановки океанич. плато	OPB

Дискриминационные диаграммы: (1) - Zr/4-2Nb-Y (Meschede, 1986); (2) - Th-Hf/3-Ta (Wood, 1980). Базальты: внутриплитные (WPT – толеиты, WPAB - щелочные) и островодужные (IAT – толеиты, IAB – известково-щелочные).

Таким образом, большинство деплетированных базальтов из всех четырех складчатых зон образовалось в обстановке океанического дна (срединно-океанического хребта), что подтверждается их ассоциацией с терригенными кремнистыми осадками (в Курайской зоне), как правило, более низким TiO_2 , деплетированным характером спектров REE, наличием четкого Nb минимума (табл., рис. 6).

В обстановке океанического острова образовались обогащенные базальты, ассоциирующие с кремнисто-карбонатными отложениями склоновых фаций. Высокие отношения Nb/La_{pm} (>1) предполагают участие в источнике компонента RSC. Расплавы выплавлялись на уровне шпинелевой ($Gd/Yb_n < 1,5$) и гранатовой ($Gd/Yb_n > 2$) фаций.

Впервые в Курайском аккреционном клине были выделены базальты переходного типа, близкие по химическому составу к океаническим платобазальтам Онтонг-Джава и Науру. По геохимическим признакам, ассоциации с отложениями склоновых фаций и мощной карбонатной шапки они представляют собой океаническое плато. Переходные и обогащенные базальты могли выплавляться из гетерогенной мантии при разных СЧП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное изучение базальтов из аккреционно-коллизийных зон АССО и Восточного Казахстана отличается от аналогичных исследований комплексным подходом, заключающемся в использовании совокупности геологических и петролого-геохимических данных и критериев. Проведенные исследования позволили более надежно определить геодинамические обстановки образования базальтов и показали, что:

1) базальты Курайской зоны (венд-ранний кембрий) образовались в условиях океанического дна (СОХ) и океанических поднятий;

2) базальты Катунской зоны (ранний кембрий), засурьинской свиты Чарыш-Теректинской зоны (поздний кембрий - ранний ордовик) и Чарского пояса (поздний девон – ранний карбон) образовались в условиях океанических островов и океанического дна (рис. 6);

3) базальты океанического дна формировались из деплетированного верхнемантийного источника, а переходные и обогащенные - из гетерогенного мантийного источника при различных СЧП;

4) с венда до раннего карбона кора Палеоазиатского океана формировалась по аналогии с корой западной части Тихого океана, в которой действовали горячие точки и мантийные плюмы, приведшие к образованию океанических островов типа Гавайской системы и океанических поднятий типа плато Онтонг-Джава.

Новые критерии и подходы, использованные автором при изучении вулканогенно-осадочных толщ (табл.), включающие детальное изучение редкоэлементного и изотопного состава базальтов, могут быть применены при геодинамических реконструкциях других регионов ЦАСП и исследованиях геодинамики палеоокеанов.

Основные публикации по теме диссертации

1. Буслов М.М., Сафонова И.Ю., Бобров В.А. Новые данные по геохимии бонинитов из курайских офиолитов Горного Алтая//Докл. РАН. – 1998. – Т. 361, № 2. – С. 244-247.
2. Буслов М.М., Сафонова И.Ю., Бобров В.А. Экзотический террейн позднекембрийско-раннеордовикской океанической коры в северо-западной части Горного Алтая (засурьинская свита): структурное положение и геохимия//Докл. РАН. - 1999. - Т. 368, № 5. - С. 650-654.
3. Буслов М. М., Травин А. В., Сафонова И. Ю. Роль субдукции океанических островов в эволюции аккреционных клиньев и выведении к поверхности высокобарических пород//Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты: Матер. XXXI Тектонич. Сов./Под ред. Ю.В. Карякина. Т. 1. – М: ГЕОС, 1998. С. 80-83.
4. Сафонова И.Ю. Позднекембрийско-раннеордовикская океаническая кора в северо-западной части Горного Алтая (засурьинская свита)//Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма: Матер. XXXI Тектонич. Сов./Под ред. Ю.В. Карякина. Том 2. – М.: ГЕОС, 1999. - С. 107-111.
5. Iwata K., Fujiwara Y., Buslov M.M., ..., Saphonova I.Yu. Geodynamics and paleo-environmental change of Central Asia (Altai) – collision of the Baltica and Siberia Continents, and the birth of formation of the Northern Eurasia Continent//Special Reports on the Regional Studies of North-East and North Pacific in Hokkaido University. – Sapporo: Hokkaido Univ. Publ., 1999. - P. 113-123.

6. Буслов М.М., Фудживара И., **Сафонова И.Ю.** и др. Строеение и эволюция зоны сочленения террейнов Рудного и Горного Алтая//Геология и геофизика. – 2000. - Т. 41, № 3. - С. 383-397.
7. Buslov M.M., **Safonova I.Yu.**, Watanabe T. et al. Gondwana-derived terranes along the marginal part of Eastern Asia: evolution and closing of the Paleo-Asian Ocean//Geosciences Journal. – 2000. - V. 4. - P. 100-102.
8. Buslov M.M., Dobretsov N.L., **Safonova I.Yu.** Kurai region in Gorny Altai// Geology, Magmatism and Metamorphism of the Western part of Altai-Sayan fold region. Field excursion guide/Eds. N.L. Dobretsov, A.G. Vladimirov. – Novosibirsk: UIGGM Publ., 2001. - P. 82-102.
9. Buslov, M.M., **Safonova, I.Yu.**, Watanabe et al. Evolution of the Paleo-Asian Ocean (Altai-Sayan Region, Central Asia) and collision of possible Gondwana-derived terranes with the southern marginal part of the Siberian continent//Geosci. J. – 2001. - V. 5, no. 3. - P. 203-224.
10. Buslov M.M., Watanabe T., Fujiwara Y., ..., **Safonova I.Yu.** et al. Geodynamics and tectonics of Central Asia: continental growth in Vendian-Paleozoic time//Gondwana Research. – 2001. - V. 4, no. 4. - P. 587.
11. Buslov M. M., Watanabe T., **Safonova I.Yu.** et al. A Vendian-Cambrian island arc system of the Siberian continent in Gorny Altai (Russia, Central Asia)//Gondwana Res. - 2002. - V. 5, no. 4.- P. 781-800.
12. **Safonova I.Yu.**, Iwata K., Buslov M.M. Fragments of the Vendian-Paleozoic oceanic crust of the Paleo-Asian Ocean (Altai-Sayan, Central Asia): identification and structural occurrence//Amalgamation of Precambrian blocks and role of Paleozoic orogens in Asia: Abstr. Int. Symp. – Sapporo. - 2002. - P. 75-77.
13. **Сафонова И.Ю.**, Буслов М. М. Чарский офиолитовый пояс: строение и состав пород//Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков/Под ред. Летникова. – Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2002. - С. 410-412.
14. **Сафонова И.Ю.**, Буслов М. М., Кох Д.А. Фрагменты океанической коры Палео-Азиатского океана в Горном Алтае и Восточном Казахстане: геохимия и структурное положение// Матер. 2-го Всерос. Симп. по вулканологии и палеовулканологии. - Екатеринбург, 2003. - С. 145-150.
15. **Сафонова И.Ю.**, Буслов М. М. Геодинамические обстановки формирования базальтов Палео-Азиатского океана складчатых областей Горного Алтая и Восточного Казахстана//Эволюция тектонических процессов в истории Земли: Матер. XXXVII Тектонич. Совещ., Новосибирск, 10-13 февр. 2004 г. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004, Т. 2. - С. 137-139.
16. **Safonova I.Yu.**, Buslov M.M., Iwata K., Kokh D.A. Fragments of Vendian-Early Carboniferous Oceanic Crust of the Paleo-Asian Ocean in Foldbelts of the Altai-Sayan region of Central Asia: Geochemistry, Biostratigraphy and Structural Setting//Gondwana Res. - 2004. - V. 7, no. 3. - P. 771-790.
17. **Safonova I.Yu.**, Buslov M.M. Geochemistry of oceanic basalts of the Katun accretionary wedge in northern Gorny Altai: evidence for mantle plume magmatism//Deep-seated magmatism: its sources and their relation to plume processes/Ed. N.V. Vladykin. – Irkutsk: Inst. Geochem., 2004. - P. 273-292.
18. **Сафонова И.Ю.**, Буслов М.М., Кох Д.А. Фрагменты океанической коры Палео-Азиатского океана в Горном Алтае и Восточном Казахстане: геохимия и структурное положение//Литосфера. – 2004. - № 3. - С. 84-96.
19. Добрецов Н.Л., Буслов М.М., **Сафонова И.Ю.**, Кох Д.А. Фрагменты океанических островов в структуре Курайского и Катунского аккреционных клиньев Горного Алтая//Геология и геофизика. – 2004. - № 12. – С. 1381-1403.
20. **Сафонова И.Ю.**, Буслов М.М. Геохимия океанических базальтов Курайской аккреционной призмы (Горный Алтай)//Глубинный магматизм, его источники и их связь с плюмовыми процессами/Под ред. Н.В. Владыкина - Иркутск, 2004. - С. 314-330.
21. **Safonova I.Yu.**, Buslov M.M. Geochemical diversity in oceanic basalts of the Zasurin Formation, NE Altai, Russia: trace element evidence for mantle plume magmatism//Problems of sources of deep magmatism and plumes/Ed. N.V. Vladykin. – Irkutsk: Inst. Geochem., 2005. - P. 247-266.
22. Симонов В.А., **Сафонова И.Ю.**, Ковязин С.В., Буслов М.М. Петрогенезис базальтов Курайского палеосимаунта (Горный Алтай)//Петрология магматич. и метаморфич. комплексов. Томск: ЦНТИ, 2005. - Вып. 5. - С. 165-170.
23. Buslov M.M., **Safonova I.Yu.**, Isozaki Y. Oceanic islands in Vendian-Early Cambrian accretionary wedges of Gorny Altai, SW Siberia: early stages of continental crustal growth of the Siberian continent//Structural and Tectonic correlation across the Central Asian orogenic collage: north-eastern segment: Guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480/Ed. E.V. Sklyarov. – Irkutsk: Print. IEC SB RAS, 2005. - P. 174-179.