

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ ИМ. В.И.ВЕРНАДСКОГО

На правах рукописи

ПОРТНЯГИН Максим Владимирович

**ПРОИСХОЖДЕНИЕ МАНТИЙНЫХ МАГМ НАД ЗОНАМИ
СУБДУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ОФИОЛИТОВОГО КОМПЛЕКСА
ТРОДОС, О.КИПР**

Специальность 04.00.02 - геохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 1997

Работа выполнена в Институте геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН

Научный руководитель: член-корресподент РАН А.В.Соболев

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук О.А.Луканин
доктор геолого-минералогических наук А.Я.Шараськин

Ведущая организация: МГУ имени М.В.Ломоносова

Защита состоится “21” января 1998 года в 10 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 002.59.02 при Институте геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН по адресу: 117975, ГСП-1, Москва, В-334, ул.Косыгина, д.19

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН

Автореферат разослан “21” декабря 1997 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук

А.П.Жидикова

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Согласно современным петролого-геохимическим моделям эволюции мантии Земли в ее истории происходило существенное взаимодействие корового и мантийного вещества. Исключительное значение в этом взаимодействии имеет геодинамическая обстановка деструктивных окраин литосферных плит, в которой происходят взаимосвязанные процессы субдукции корового вещества в мантию и процессы частичного плавления, приводящие к образованию новой коры. В последние годы был достигнут значительный прогресс в понимании этих сложных процессов и для их описания предложен ряд количественных моделей, опирающихся на определенные представления о происхождении надсубдукционных магм [McCulloch, Gamble, 1991; Davies, Stevenson, 1992; Tatsumi, Kogiso, 1997; Sobolev, Chaussidon, 1996].

Все это делает особенно актуальным вопрос о количественной характеристике физико-химических условий образования и эволюции мантийных магм над зонами субдукции. Важнейшими задачами в этом направлении исследования в настоящее время являются: (1) определение состава и условий образования первичных магм надсубдукционных зон и (2) количественная оценка вклада мантии и субдуцированной плиты в состав источника первичных магм. В решении этих задач на основе комплексного петролого-геохимического подхода заключается актуальность и обоснование цели данной работы.

Объектом исследования стал офиолитовый комплекс Тродос на о.Кипр. Этот массив является классическим примером офиолитов надсубдукционного типа [Pearce et al., 1984] и представляет уникальный практически ненарушенный полный разрез палеоокеанической коры, сложенной геохимически разнообразными производными мантийных магм надсубдукционного происхождения.

Цель работы.

Цель настоящей работы состоит в решении следующих вопросов петрологии и геохимии пород эффузивного и дайкового комплексов массива Тродос:

1. Выделение геохимических типов пород, характеристика их возрастных взаимоотношений, пространственного распределения и объемных соотношений;
2. Определение условий кристаллизации примитивных магм;
3. Определение составов первичных магм и их мантийных источников;
4. Определение физико-химических условий образования первичных магм.

Научная новизна

1. На примере комплекса Тродос впервые на количественном уровне определены составы первичных магм полного разреза эффузивных пород палеоокеанической коры надсубдукционного типа, включая содержание редких и летучих компонентов, составы минералов ликвидусной ассоциации и физико-химические условия кристаллизации.

2. Установлено, что в процессы магмобразования над зонами субдукции в узком временном интервале могут быть вовлечены контрастные по температуре и глубинности мантийные источники. Это может приводить к образованию ассоциации высококальциевых бонинитов и островодужных толеитов, характерной для массива Тродос, многих офиолитовых комплексов и современных надсубдукционных зон.

3. Количественно оценен состав H_2O -содержащего флюида/расплава, привнесенного в мантийные источники магм Тродоса. На основании полученной

зависимости между количеством H_2O -содержащего флюида/расплава в источнике и степенью его плавления показано, что плавление мантийных источников надсубдукционных магм может происходить главным образом вследствие понижающего влияния H_2O на температуру солидуса перидотита.

4. В виде включений во вкрапленниках магнезиального оливина и хромистой шпинели установлены расплавы с экстремальным фракционированием несовместимых элементов. Присутствие таких расплавов в надсубдукционных зонах определяется комплексным влиянием двух факторов: плавлением мантии в режиме открытой системы, проницаемой для расплавов при их низком содержании, и сильными вариациями содержаний несовместимых элементов в составе H_2O -содержащего флюида/расплава, инициирующего плавление.

Практическая ценность

1. Полученные фактические данные об условиях образования первичных расплавов массива Тродос представляют собой количественную основу для разработки геодинамических моделей островодужных систем;

2. Определение состава H_2O -содержащего компонента в источнике надсубдукционных магм и его роли в образовании первичных магм является основой для количественной оценки баланса масс несовместимых элементов и H_2O между различными вещественными резервуарами Земли;

3. Применение предложенных методических разработок существенно повышает надежность и эффективность петролого-геохимических исследований, направленных на выяснение состава и условий образования первичных мантийных магм и их мантийных источников.

Фактический материал

В основу работы положен фактический материал, полученный в результате исследования коллекции примитивных вулканических и дайковых пород офиолитового комплекса Тродос (около 300 образцов), собранных автором совместно с А.В.Соболевым, Л.В.Дмитриевым и В.Г.Батановой в полевых сезонах на Кипре 1993-1994 годов, в рамках проекта, поддержанного фондом Volkswagen Stiftung, а также собранных Л.В.Данюшевским, Л.В.Дмитриевым и В.С.Каменецим в 1989 году в ходе 12-го рейса нис "Академик Борис Петров" и в полевом сезоне 1990 года, проводившихся в рамках проекта "Тетис".

Были исследованы шлифы и прозрачно-полированные пластинки для всех образцов, также было приготовлено около 50 препаратов для оптического и аналитического исследования минералов и вулканических стекол. В ходе работы было проведено около 300 термометрических экспериментов с оптическим контролем с расплавленными включениями в минералах.

В работе использовались следующие методы валового и локального количественного химического анализа: рентгено-флюоресцентный анализ (петрогенные и редкие элементы в породах - около 300 анализов); инструментальный нейтронно-активационный анализ (редкие элементы в породах - 40 анализов), электронно-зондовый анализ (частичный и полный силикатный анализ, Cl и S в вулканических стеклах, расплавленных включениях и минералах - около 3000 анализов), вторично-ионная масс-спектрометрия (редкие элементы и H_2O в вулканических стеклах и расплавленных включениях - около 100 анализов), масс-спектрометрия индукционно-связанной плазмы с лазерной экстракцией (редкие элементы в

вулканических стеклах - 15 анализов), ИК Фурье-спектроскопия (H_2O в вулканических стеклах - около 30 анализов).

При обработке и систематизации фактического материала использовались все доступные литературные данные и неопубликованные материалы из фондов Геологической Службы Кипра по исследуемой проблеме. В ходе работы был создан компьютерный банк данных по составу пород и минералов офиолитового комплекса Тродос и прилегающих районов, насчитывающий около 10 000 анализов петрогенных и редких элементов.

Личный вклад автора

1) Картирование и геологическое описание разрезов лавового и дайкового комплексов Тродоса, отбор представительных образцов пород и стекол. 2) Подготовка каменного материала для изготовления шлифов, пластинок, проведения различного вида анализов, отбор мономинеральных фракций, изготовление прозрачно-полированных препаратов для микронзондового и экспериментального изучения. 3) Оптические исследования петрографии и минералогии объектов исследования, диагностика и классификация магматических включений. 4) Разработка методики и проведение экспериментальных исследований расплавных включений в минералах. 5) Проведение электронно-зондовых анализов расплавных включений и минералов. 6) Совершенствование методики количественного микроанализа элементов-примесей и H_2O методом вторично-ионной масс-спектрометрии. 7) Разработка методов численного моделирования магматических процессов. 8) Создание базы данных составов пород и минералов Тродоса. 9) Систематизация и обобщение полученных результатов, сравнение их с литературными данными.

Апробация работы

Непосредственно по теме работы автором опубликовано 7 статей в рецензируемых российских и международных журналах (Contributions to Mineralogy and Petrology, Петрология, Геохимия, Доклады РАН).

Результаты исследований по теме диссертации представлены в 12 опубликованных тезисах докладов и докладывались на Рабочем Совещании по изучению расплавных включений (1992 г., ГЕОМАР, ФРГ), на 10-й Международной школе по морской геологии (Геленджик, 1992 г.), на 7-м Конгрессе европейского геофизического союза (Страсбург, Франция, 1993 г.), на 5-ой Панамериканской конференции по исследованию флюидных включений (Куэрнавака, Мексика, 1994), на 16-м Конгрессе Международной минералогической ассоциации (Пиза, Италия, 1994 г.), на сессиях Американского Геофизического Союза (Балтимор, США, 1995 г., Сан-Франциско, США, 1997г.), на Международном Офиолитовом симпозиуме (Павиа, Италия, 1995), на 5-й Международной конференции памяти Л.П.Зоненшайна (Москва, 1995 г.), на Юбилейной сессии Ученого Совета ГЕОХИ РАН "ГЕОХИ-50 лет" (Москва, ГЕОХИ РАН, 1997 г.), на "Семинаре по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии" (Москва, ГЕОХИ РАН, 1997 г.).

Структура и объем работы

Работа состоит из 4 разделов, введения, заключения, списка литературы и приложения. В первом разделе (Глава 2) приводится литературный обзор и ставится задача исследования. Второй раздел (Глава 3) посвящен методическим вопросам. В третьем разделе (Главы 4-8) описывается объект исследования, экспериментальные и аналитические данные. Четвертый раздел (Главы 9-11) посвящен обсуждению полученных результатов. Главы 1-9 завершаются краткими выводами.

Текстовой и иллюстративный материал изложен на 320 страницах и включает 96 рисунков, 13 таблиц в тексте и 20 таблиц в приложении, список литературы включает 260 наименований.

Автор выражает благодарность научному руководителю член-корреспонденту РАН А.В.Соболеву за руководство работой, создание условий для ее проведения, поддержку и внимание. Главные выводы этой работы были бы невозможны без уникального каменного материала, собранного В.С.Каменецким, Л.В.Данюшевским и Л.В.Дмитриевым, которым автор также искренне признателен за постоянную поддержку, хорошие советы и критические замечания. При работе над диссертацией автор постоянно чувствовал заботу и внимание коллег по лаборатории геохимии магматических и метаморфических пород, а также других сотрудников ГЕОХИ РАН В.Б.Наумова, Э.Н.Баранова, А.А.Мигдисова, А.А.Арискина, которым автор приносит свою искреннюю благодарность. Большую помощь в работе оказала Н.Н.Кононкова, выполнившая сотни высококачественных микрозондовых анализов, С.Эггинс проанализировал коллекцию стекол методом индукционно-связанной плазмы, Т.Ханстин проанализировал содержания летучих компонентов в стеклах и расплавных включениях.

Считая приятным долгом выразить благодарность Геологической Службе Кипра в лице ее директора Г.Константину и Hellenic Mining Company в лице ее директора Г.Малиотиса, оказавшим помощь в получении фондовых материалов и в проведении полевых работ.

2. ОФИОЛИТОВЫЙ КОМПЛЕКС ТРОДОС: РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДАННОЙ РАБОТЫ.

Массив Тродос расположен в наиболее западной части протяженного пояса офиолитов поздне мелового возраста, прослеживающихся по северной границе Арабской платформы. В составе массива наблюдаются все основные элементы офиолитового разреза (снизу-вверх): тектонизированные перидотиты, расслоенный кумулятивный комплекс, габброиды, комплекс параллельных даек, вулканы и глубоководные осадки. Возраст массива оценивается примерно в 90 млн. лет [Mukasa, Ludden, 1987]. Интенсивные исследования Тродоса проводятся на протяжении более чем 30 лет и в настоящее время он является наиболее детально изученным и самым известным офиолитовым комплексом в мире. Согласно современным представлениям, образование ассоциации магматических пород Тродоса связано с магматизмом над зоной субдукции, существовавшей в поздне мезозойское время в океане Тетис [Pearce et al., 1984]. Лавовый комплекс Тродоса сложен двумя основными типами пород. В его нижней части (“Нижние Пиллоу-Лавы”, далее НПЛ) преобладают дифференцированные андезиты, дациты и риолиты островодужного толеитового типа, в верхней части (“Верхние пиллоу-лавы”, далее ВПЛ) - более примитивные андезиты, базальты и пикриты, охарактеризованные как бониниты [Schmincke et al, 1983]. Среди ВПЛ установлено 3 геохимических типа пород [Cameron, 1985], различающихся содержанием умеренно несовместимых элементов (Ti, Y, Zr, тяжелые РЗЭ). В разрезах ВПЛ северного Тродоса продемонстрировано обеднение лав несовместимыми элементами вверх по разрезам [Taylor, 1990]. По сравнению с толеитами океанических рифтов (далее ТОР) породы Тродоса характеризуются более низкими содержаниями РЗЭ, Ti, Zr, Y, повышенными

содержаниями H_2O , K, Rb, Ba, что интерпретируется как свидетельство образования магм при плавлении обедненной мантии в присутствии одного или нескольких обогащенных компонентов [Rautenschlein et al., 1987; Cameron, 1985 и др.].

В настоящее время открытыми остаются ряд принципиальных вопросов, решение которых необходимо для создания основы количественно обоснованной модели магмобразования массива Тродос. Этими вопросами являются следующие:

1. Характеристика геохимических типов магм, основанная на составах наиболее примитивных пород в лавовом и дайковом комплексах;
2. Определение закономерностей пространственного распределения пород разных геохимических типов;
3. Определение условий кристаллизации и составов родоначальных магм разных геохимических типов;
4. Определение состава и P-T условий образования первичных расплавов;
5. Количественная характеристика независимых компонентов в источнике магм;
6. Определение режима плавления мантийного вещества;
7. Выявление связи условий образования магм в мантии с тектонической обстановкой формирования массива.

Методический подход использованный в работе заключается в последовательном решении следующих задач: 1) Общая характеристика главных геохимических типов пород Тродоса на основе всего доступного материала, полученного другими исследователями, и оригинальных данных с целью выявления наиболее общих закономерностей эволюции магматизма массива; 2) Выделение наиболее примитивных разновидностей пород в каждом геохимическом типе; 3) Детальная минералогическая характеристика ключевых образцов с целью выявления ликвидусной ассоциации; 4) Исследование магматических включений в минералах ликвидусной ассоциации с целью определения условий кристаллизации и вариаций составов родоначальных магм; 5) Численное моделирование процессов плавления мантийного вещества с целью определения параметров образования магм. 6) Синтез данных, полученных для ключевых образцов, с общими закономерностями эволюции магматизма массива.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Исследование основано на современных методах валового и локального анализа вещества, позволяющих определять состав пород, минералов и стекол с погрешностью менее 5 отн.% для главных элементов и менее 20 отн.% для широкого спектра элементов-примесей и H_2O . Содержания элементов-примесей и H_2O в расплавных включениях определялись методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS).

3.2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ.

Многие принципиальные выводы работы основаны на данных изучения магматических включений в минералах. Захваченные минералами во время своего роста, включения обладают уникальной потенциальной способностью сохранять текущую информацию о постоянно меняющемся составе и условиях существования магматической системы. Целью методов изучения включений, описанных в данном

разделе, является расшифровка этой информации и обоснование ее представительности для описания процессов, происходящих в макросистеме.

В работе показано, что эффект пограничного слоя неразличим в составе изученных расплавных включений размером по крайней мере более 20 мкм. Полученный результат непосредственно применим для андезит-базальтовых и более магнезиальных магм с высоким содержанием $H_2O > 1$ мас. %.

После захвата расплавного включения происходит его частичная изоляция от внешней среды. Минерал-хозяин не является идеальным изолятором, и включение может существенно изменять свой состав при изменении условий в макросистеме. Для включений в минералах Тродоса наиболее характерен промежуточный вариант между двумя возможными крайними случаями эволюции состава герметичных включений при изоляции минерала-хозяина от взаимодействия с расплавом в макросистеме [Соболев, 1983]. Это отражает двухэтапную эволюцию магм с момента начала кристаллизации и захвата включений до излияния магм на поверхность и закалки.

Для оценки температур кристаллизации минералов и состава расплава было проведено экспериментальное исследование расплавных включений. Эксперименты проводились на высокотемпературной малоинерционной установке для исследований под микроскопом [Соболев, Слуцкий, 1984]. Точность определения температур кристаллизации этим методом оценивается как ± 20 °С. В качестве независимых критериев соответствия $T_{гом}$ температурам кристаллизации использовались результаты моделирования и прямое сопоставление с данными других геотермометров. Для включений в *Sp* $T_{гом}$ не определялась, зерна с включениями нагревались до 1300 или 1350 °С и закаливались.

Для определения состава захваченного минералом расплава составы гомогенизированных расплавных включений в *Ol* корректировались до равновесия с минералом-хозяином по методу, описанному в [Данюшевский и др., 1991], путем моделирования изокатионного обмена Mg и Fe между оливином и расплавом при одновременном понижении температуры равновесия. Составы природных стекловатых включений в *Ol* корректировались путем моделирования сплавления *Ol* со стенок включения по фракционному механизму. Дефицит Fe во включениях в *Sp* моделировался сплавлением магнетита со стенок включения до достижения уровня содержания Fe, типичного для исследованных пород и стекол.

3.3 РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ

Для расчета ликвидусных температур минералов в работе использовались термометры из работ [Ford et al., 1983; Арискин et al., 1986], прямо протестированные на основе данных экспериментальных работ с расплавами Тродоса. Влияние H_2O на температуры ликвидуса учитывалось по данным работы [Альмеев, Арискин, 1996]. Продемонстрировано субсолидусное переуравновешивание включений *Sp* в *Ol*, приводящее к понижению $Mg\# Sp$ на 5-10 мол. % и занижению расчетных температур кристаллизации, оцененных на основе *Ol-Sp* термометра [Ballhaus et al., 1990], на 50-400 °С. Проведен сравнительный анализ различных расчетных методов определения fO_2 и Fe^{2+}/Fe^{3+} в расплаве при кристаллизации мантийных магм. Показано, что уравнение [Maurel, Maurel, 1982], связывающее Fe^{2+}/Fe^{3+} в расплаве и *Sp*, адекватно описывает это равновесие в высокотемпературной области вплоть до 1400 °С. Следствием этого факта является хорошая сходимость результатов оценки fO_2 по

методике [Danyushevsky, Sobolev, 1996], связанной с данными [Maurel, Maurel, 1982], и полностью независимой модели [Арискин, Николаев, 1995]. Оценка возможного влияния переуравновешивания Sp с OI при расчете $\lg(fO_2)$ для магм Тродоса по различным моделям составляет +0.8 [Ariskin, Nikolaev, 1996], +1.0 [Danyushevsky, Sobolev, 1996], -0.3 [Ballhaus et al., 1990].

3.4 МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрены использованные в работе методы моделирования кристаллизации магм [Данюшевский, 1991; Ariskin et al., 1993] и мантийного плавления [Shaw, 1970; Sobolev, Shimizu, 1993; Ozawa, Shimizu, 1995]. Приведены результаты первого опыта моделирования кристаллизации водонасыщенных магм в рамках программного пакета "КОМАГМАТ-3.0" [Ariskin et al., 1993]. Показано хорошее соответствие расчетных и прямых экспериментальных данных [Gaetani et al., 1994] по кристаллизации андезитобазальтового расплава при $P_{H_2O}=0.001-2$ кбар и $T=1000-1250^\circ\text{C}$.

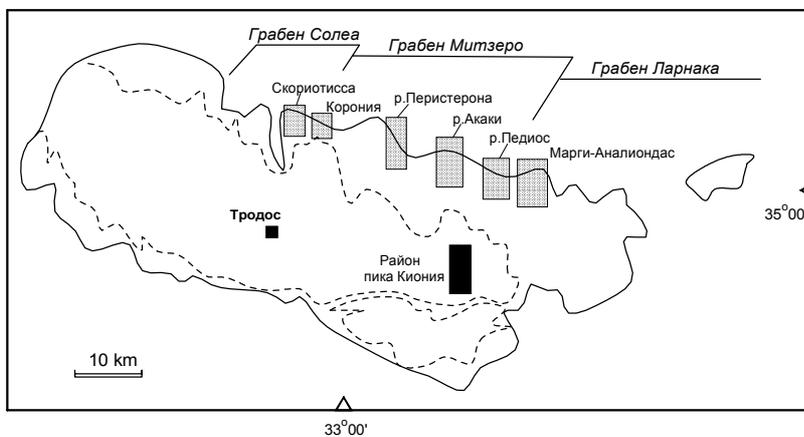


Рис. 1 Районы детальных полевых исследований. Сплошной линией показан контур офиолитового массива, пунктирной линией - ориентировочная граница лавового и дайкового комплексов

лавового комплекса Тродоса. Во всех разрезах установлено присутствие ультрамафических лав, даек или силлов. Впервые на Тродосе (район Марги-Аналиондас) были описаны неизменные высокомагнезиальные НПЛ, представляющие наиболее примитивные продукты инициальной стадии магматизма офиолитового массива. Собранная коллекция включала более 300 образцов пород, в том числе 50 образцов ультрамафических лав и даек и около 100 образцов закалочных стекол.

5. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОРОД ЛАВОВОГО И ДАЙКОВОГО КОМПЛЕКСОВ

5.1 ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТИПЫ ПОРОД

5.1.1 Главные геохимические типы лав

В настоящее время большинством исследователей Тродоса признано, что двумя основными типами пород Тродоса, представляющими, соответственно, ранний и поздний этапы эволюции магматизма, являются НПЛ и ВПЛ [например, Robinson et al., 1983]. Принципиальный вопрос заключается в определении генетических взаимоотношений между ними. Наиболее корректный подход к решению этого вопроса возможен на основе изучения наиболее примитивных высокомагнезиальных

4. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основу исследования составили материалы полученные в ходе полевых работ на Кипре в 1991-1994 г.г. Главными объектами исследования стали проявления наиболее свежих и примитивных пород лавового и дайкового комплексов северной части офиолитового массива (Рис.1). Изучено несколько полных разрезов

пород, несущих прямую информацию о составе родоначальных расплавов. Если примитивные *Ol*-порфировые базальты являются обычными составляющими разрезов ВПЛ, то неизменные высокомагнезиальные НПЛ были прежде неизвестны и впервые обнаружены в ходе данного исследования в районе Аналиондас.

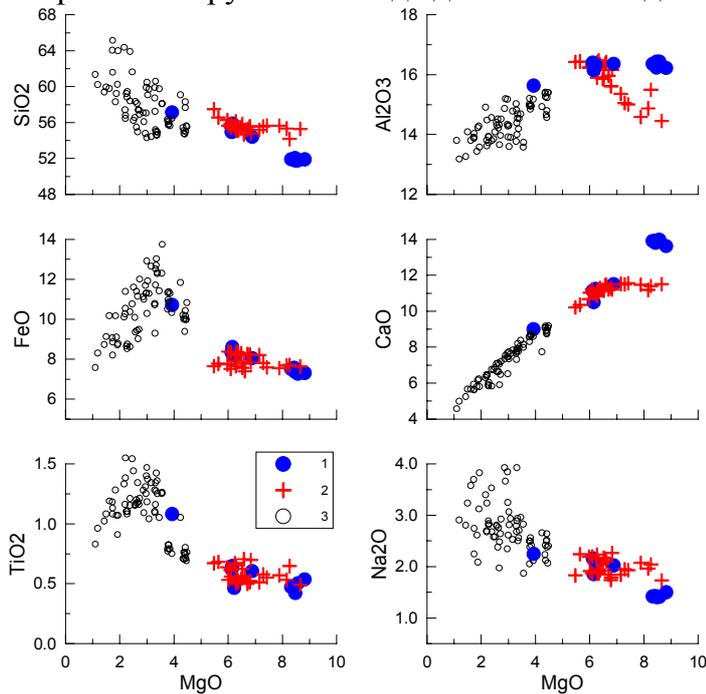


Рис. 2 Содержание петrogenных элементов в главных геохимических типах стекол Тродоса. 1- стекла НПЛ из района Аналиондас; 2- примитивные стекла ВПЛ из района Марги (данные автора и [Bailey, 1984; Taylor, 1988]); 3- типичные стекла НПЛ из различных регионов Тродоса.

Стекла района Аналиондас образуют тренд составов от 8.5 мас.% до 4 мас.% MgO, наименее магнезиальные стекла полностью соответствуют по составу НПЛ андезит-дацитового состава (Рис. 2). В то же время, наиболее примитивные стекла НПЛ отличаются по составу от типичных ВПЛ и демонстрируют повышенные содержания Al_2O_3 , CaO и пониженные содержания SiO_2 , FeO по сравнению с ВПЛ при одинаковом содержании MgO~8.5 мас.%. Различия в составах примитивных стекол НПЛ и ВПЛ не могут быть объяснены процессами кристаллизационной дифференциации и предполагают существование самостоятельных родоначальных расплавов, на различных этапах эволюции магматизма офиолитового массива.

5.1.2 Геохимические типы примитивных ВПЛ

Впервые присутствие среди ВПЛ пород различных геохимических типов было показано в работе [Cameron, 1985]. В данной работе для типизации ВПЛ использовалось отношение Al_2O_3/TiO_2 (далее А/Т). Эффективность использования этого критерия обусловлена несколькими факторами. Среди них важнейшими являются: чувствительность к вариациям состава родоначальных магм; применимость к обширной базе данных пород, для которых известны содержания только петrogenных окислов; слабая чувствительность к процессам вторичного изменения; слабая чувствительность к процессам кристаллизации и кумуляции главных минеральных фаз ВПЛ (*Ol*, *Cpx*, *Sp*). Основным ограничением применения этого критерия является присутствие на ликвидусе либо в качестве кумулятивных фаз плагиоклаза и/или магнетита. Судя по петрографическим данным [Rautenschlein et al., 1985; Thy, Xenophonos, 1993] и характерному тренду изменения составов расплавов Тродоса при фракционировании (Рис. 2), такое ограничение не распространяется на большую часть ВПЛ с содержанием $MgO > 6$ мас.%.

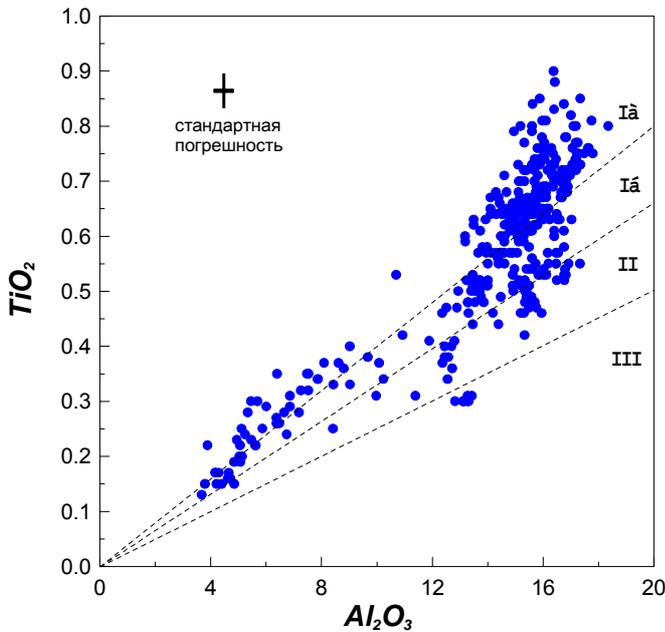


Рис. 3 Геохимические типы ВПЛ. Пунктирные линии разделяют поля различных типов пород, первоначально выделенные в работе [Cameron, 1985] на основании независимых критериев.

дискретных групп пород, различающихся по А/Т, что указывает на непрерывный характер изменения геохимических характеристик ВПЛ. С этой точки зрения предложенная типизация является в значительной степени условной и применяется нами для удобства геохимической характеристики пород.

Кроме очевидных различий по содержанию TiO_2 , которые следуют из самого принципа типизации, породы разных типов также ясно различаются по ряду других геохимических признаков. От типа ВПЛ-1 к ВПЛ-3 происходит монотонное уменьшение содержаний Na, Zr, Sr, Y, тяжелых и средних РЗЭ. С увеличением степени обедненности лав умеренно-несовместимыми элементами (увеличение А/Т) наблюдается отчетливая тенденция увеличения содержаний щелочей, Th, U, Sr и Na относительно РЗЭ и TiO_2 , хотя абсолютные содержания этих элементов уменьшаются или остаются постоянными (Рис. 4). Отношение Th/U с увеличением А/Т понижается. Отметим также, что примитивные стекла НПЛ на большинстве графиков выпадают из общего тренда ВПЛ, что свидетельствует в пользу отсутствия генетической связи между этими типами магм.

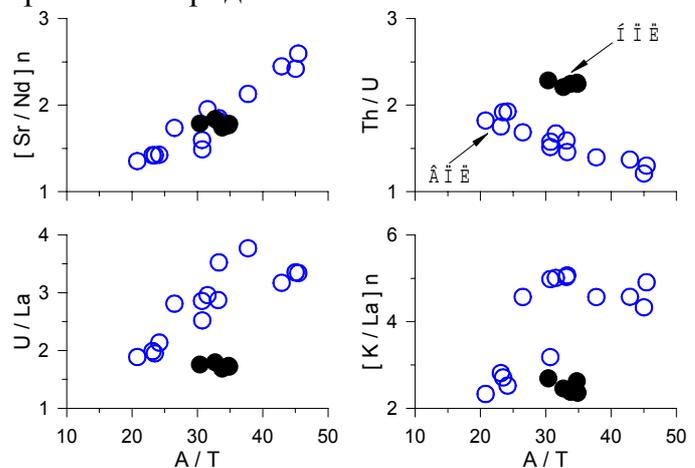


Рис. 4 Составы примитивных ($MgO > 6$ мас.%) стекол ВПЛ (открытые кружки) и НПЛ (затитые кружки) Тродоса.

Сравнение по А/Т составов пород, первоначально типизированных в работе [Cameron, 1985], показало, что лавы типа 1 имеют А/Т менее 30, тип 2 - 30-40 и тип 3 более 40. Составы всей выборки примитивных пород и стекол ВПЛ показаны на Рис. 3. А/Т в породах варьирует от 20 до 42, и формально лавы представляют типы 1, 2 и 3 по [Cameron, 1985]. Учитывая большую представительность лав типа 1, в нем были выделены подтипы 1a и 1б, имеющие А/Т равное 20-25 и 25-30, соответственно. Весьма характерно, что во всех типах ВПЛ присутствуют породы различной степени магнезиальности от андезитов-базальтов до ультрамафитов, что служит явным признаком их когенетичной природы. Также следует отметить отсутствие

5.1.3 Геохимические типы даек

Первичная типизация пород дайкового комплекса Тродоса была проведена, используя обширную базу данных [Baragar et al., 1989] по составу даек с различным

количеством закалочных краев. Идея такого подхода заключается в том, что количество закалочных краев у даек при развитии структур типа “дайка-в-даике” может в определенной степени служить индикатором относительного времени внедрения. Полученные результаты показали, что между возрастом внедрения и составом даек корреляция отсутствует и магнезиальные разности одинаково распространены среди даек всех типов. На первый взгляд эти данные противоречат присутствию в низах разрезов лав дифференцированных НПЛ и в верхах - более примитивных ВПЛ [Robinson et al., 1983]. Данные о присутствии в низах разрезов НПЛ пород базальтового состава, полученные в этой работе и работах [Taylor, 1987; Bernarz, Schmincke, 1994], позволяют снять это противоречие и предположить, что многие из магнезиальных даек на самом деле являются питающими каналами примитивных НПЛ, а не ВПЛ, как предполагалось ранее [Baragar et al., 1989]. Об этом прямо свидетельствует статистически повышенная магнезиальность даек в тех районах Тродоса, где установлены значительные по мощности примитивные НПЛ. Аналоги ВПЛ также присутствуют в дайковом комплексе, но относятся к наиболее поздним образованиям и представлены в резко подчиненном количестве. К этому типу относятся изученные в работе ультрамафические дайки. Близкий результат был получен и в работе [Thy, 1995] на основе кластерного анализа.

5.2 ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ВПЛ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ТИПОВ

Распределение геохимических типов ВПЛ в субширотном направлении в целом подчиняется структурному контролю. Лавы восточных грабенов, Митзеро и Ларнака (рис.1), имеют близкий состав. Среди лав преобладает геохимический тип 1 с подчиненным количеством типа 2 ($A/T=20-35$, $Zr/Y=1-3$, $Ti/V=100-200$, $[La/Sm]_n=0.5-0.8$). Лавы западного грабена Солеа характеризуются специфическим составом. Здесь установлены наиболее обедненные по A/T (до 45) и Ti/V (до 70) разности. Лавы грабена Солеа также демонстрируют некоторое обогащение легкими РЗЭ ($[La/Sm]_n \sim 1$). В пределах грабенов четкой зональности не наблюдается, и лавы различных геохимических типов тесно ассоциируют друг с другом.

В распределении различных геохимических типов ВПЛ в разрезах наблюдается отчетливая вертикальная зональность. Низы разрезов ВПЛ обычно сложены породами типа ВПЛ-1а, вверх по разрезу они сменяются типами ВПЛ-1б и 2. Параллельно меняется состав минералов ассоциации вкрапленников. Хромистость Sp и максимальная магнезиальность вкрапленников Ol систематически повышаются вверх по разрезу вместе со степенью обеднения пород несовместимыми элементами.

5.3 ОБЪЕМНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПОРОД РАЗНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ТИПОВ

Обобщение данных по стратиграфии различных районов лавового комплекса Тродоса [Bernarz, Schmincke, 1994; Taylor, 1987] показало, что НПЛ слагают от 65% до 90 и более % общей мощности лавовых разрезов. В дайковом комплексе также преобладают аналоги НПЛ, объемы которых составляют по некоторым оценкам до 95% всех даек [Thy, 1995].

Максимальную мощность в разрезах ВПЛ всегда имеют наименее обедненные лавы типа ВПЛ-1а (45-75 об.%), объемы лав других типов уменьшаются с увеличением степени их обедненности (ВПЛ-1б - 17-33 об.%, ВПЛ-2 - 8-20 об.%). Указанная тенденция полностью сохраняется при анализе всей выборки составов ВПЛ северного Тродоса (ВПЛ-1а - 54%, ВПЛ-1б - 29%, ВПЛ-2 - 13%, ВПЛ-3 - 3%).

6. УЛЬТРАМАФИЧЕСКИЕ ЛАВЫ И ДАЙКИ

Ультрамафические породы, детально исследованные в этой работе, относятся к типу НПЛ и 3-м геохимическим типам ВПЛ. Типы НПЛ, ВПЛ-1а и 1б представлены ультрамафическими лавами, силлами и дайками, локализованными в лавовом комплексе Тродоса. Тип ВПЛ-2 представлен исключительно ультрамафическими дайками из дайкового комплекса.

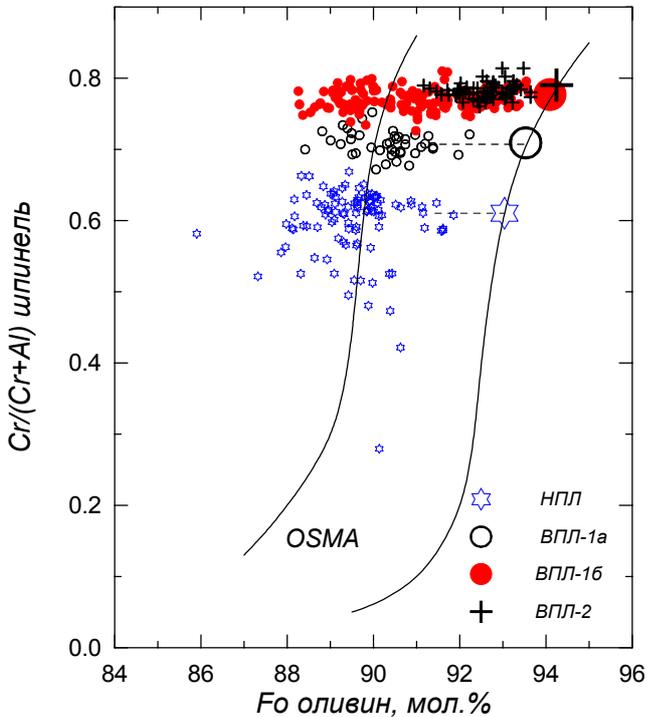


Рис. 5 Составы ассоциации оливин-хромистая шпинель в примитивных магмах Тродоса. OSMA- поле ассоциации оливина и шпинели реститогенных перидотитов [Arai, 1994]. Укрупненными значками показана оценка максимальной магнезиальности ликвидусного оливина первичных магм.

НПЛ района Аналиндас. Фазовый состав основной массы представлен ассоциацией $Crpx+Ol$ и стеклом в стекловатых разностях и ассоциацией $Orpx+Crpx+Ol+Pl+Mt$ в существенно раскристаллизованных породах. Структура основной массы обычно витрофировая, микролитовая или реже долеритовая.

НПЛ отличаются от всех типов ВПЛ пониженной магнезиальностью и повышенным CaO в Ol , пониженной хромистостью Sp (Таблица 2, Рис. 5). В ряду геохимических типов ВПЛ-1а-1б-2 наблюдается систематическое увеличение максимальной и средней магнезиальности Ol , увеличение хромистости Sp , уменьшение TiO_2 в Sp и $Crpx$. Хорошая корреляция наблюдается между A/T в породах и A/T в $Crpx$ и Sp . В целом минералы НПЛ имеют состав промежуточный между минералами ТОР [Соболев и др., 1991] и базальтов окраинных морей [Шараськин, 1992], с одной стороны, и минералами из пород толеитовой и бонинитовой серий современных островных дуг, с другой стороны [Sigurdsson et al., 1993]. Минералы ВПЛ по всем признакам демонстрируют очевидное сходство с островодужными толеитами и высококальциевыми бонинитами [Sigurdsson et al., 1993; Sobolev,

6.1 ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Все исследованные ультрамафические породы представлены крупнопорфировыми разностями с вкрапленниками магнезиального Ol типичного размера 2-10 мм. Содержание Ol составляет 30-65 об.%. Акцессорный $Cr-Sp$ постоянно присутствует в виде включений в Ol или образует самостоятельные фенокристаллы размером до 1-2 мм. $Crpx$ в исследованных образцах присутствуют несистематично. До 10 об.% вкрапленников $Crpx$ присутствует в ультрамафических лавах НПЛ района Аналиндас и ВПЛ из районов Перистерона и Педиос. В породах из районов Акаки и Марги $Crpx$ образует фенокристы второй генерации в субвулканических разностях пород. $Orpx$ в виде корродированных микрофенокристов установлен в лавах Марги. Микрофенокристы Pl установлены в ультрамафических НПЛ

Danyushevsky, 1994], особенно проявленное для минералов из наиболее обедненных типов пород ВПЛ-1б и 2.

6.2 ГЕОХИМИЯ

Содержания петрогенных окислов в породах составляют (в мас.%): $MgO=22-39$, $SiO_2=51-43$, $TiO_2=0.45-0.15$, $Al_2O_3=4-11$, $FeO=8.3-10$, $CaO=3-10$, $Na_2O=0-1.2$. Взаимные вариации элементов подчинены оливиновому контролю. Различия в составе пород при одинаковом MgO четко проявляются по содержаниям TiO_2 , FeO , Na_2O и P_2O_5 . Минимальные концентрации Na_2O и P_2O_5 установлены в типе ВПЛ-2, несколько более высокие - в типах ВПЛ-1а и 1б. Тип ВПЛ-1а характеризуется пониженными концентрациями SiO_2 . Тип ВПЛ-2 имеет максимальные концентрации CaO и минимальные концентрации Al_2O_3 . Ультрамафические лавы НПЛ, по сравнению с ВПЛ, имеют низкий SiO_2 и несколько повышенный Al_2O_3 , по аналогии с составами закалочных стекол НПЛ и ВПЛ (Рис. 2). По содержанию других петрогенных элементов ультрамафические НПЛ близки к ВПЛ-1а и б.

Все исследованные образцы обогащены относительно ассоциирующих базальтов типоморфными элементами ультрамафических пород (Cr , Ni , Co) и обеднены несовместимыми элементами ($R_3Э$, Zr , Hf , Th и др.). В ряду типов ВПЛ-1а-1б-2 отчетливо наблюдается уменьшение концентраций элементов группы $R_3Э$ и высокозарядных элементов Y , Zr , Hf . По содержанию Ta породы всех типов близки. Породы демонстрируют плоские или обедненные спектры нормализованных к хондриту содержаний $R_3Э$. Степень обедненности легкими $R_3Э$ растет от типа ВПЛ-1а к типу ВПЛ-2. Для ВПЛ-2 характерно $[La/Сe]_n > 1$ и V-образный спектр нормализованных концентраций $R_3Э$. Ультрамафические лавы НПЛ по содержанию элементов примесей близки к типу ВПЛ-1.

7. МАГМАТИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ

Вкрапленники минералов исследованных образцов содержат магматические включения нескольких типов. 1) Первичные включения силикатного расплава были установлены в Ol , Sp и Cpx . В минералах ультрамафических лав расплавные включения либо частично раскристаллизованы ($Cpx+Gl+Fluid \pm Amf \pm Al-Sp$) либо стекловатые ($Gl \pm Fluid$). Включения в Sp из даек полностью раскристаллизованы ($Amf+Cpx+Fluid$). 2) Малоплотные флюидные включения существенно водного состава установлены в Ol и Cpx . 3) Твердофазовые включения обычно представлены мелкими кристалликами Sp в Ol , реже в Cpx . Для НПЛ характерны включения Cpx в Ol и обратные взаимоотношения; 4) Включения Fe-Ni сульфидного расплава установлены в Ol НПЛ. Мелкие сульфидные глобулы постоянно присутствуют также и в расплавных включениях в Ol НПЛ. Они представляют собой результат ликвации внутри включений, происшедшей после изоляции включений от внешней среды.

Наличие магматических включений в наиболее магнезиальных вкрапленниках оливина ($Fo_{93.5}$) свидетельствует об их кристаллизации из магматического расплава, а не ксеногенном происхождении, как предполагалось в ряде работ [Cameron, 1985; Bogdier, 1991]. Кристаллизация магм всех типов происходила в условиях насыщенности флюидом. Магмы ВПЛ испытывали длительную кристаллизацию ассоциации $Ol+Sp$, затем к ним присоединялся Cpx , для НПЛ характерна ранняя котектическая кристаллизация тройной ассоциации $Ol+Cpx+Sp$. Магмы НПЛ были близки к насыщению сульфидной серой.

8. УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СОСТАВ ПРИМИТИВНЫХ МАГМ

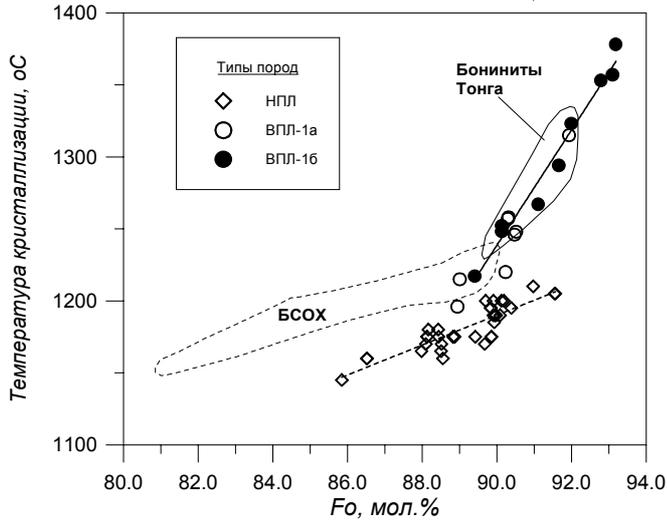


Рис. 6 Температуры кристаллизации высокомагнезиального оливина в различных типах ультрамафических лав Тродоса. Используются данные гомогенизации расплавных включений. Для сравнения приведены поля температур кристаллизации БСОХ (по [Соболев и др., 1988]) и высоко-Са бонинитов желоба Тонга (по [Sobolev and Danyushevsky, 1994]).

высокотемпературные. ВПЛ имеют крутой наклон тренда, характерный для магматических серий с продолжительной кристаллизацией одной фазы - оливина ($\pm Sp$) (например, бониниты Тонга [Sobolev, Danyushevsky, 1994]). Тренд НПЛ характеризуется более пологим наклоном, типичным для области котектической кристаллизации силикатов (например, ТОР) [Кадик и др., 1990]. Начало кристаллизации Srx в НПЛ и ВПЛ фиксируется при $\sim 1200^\circ\text{C}$.

Данные барометрии по составу Srx [Nimis, 1995], а также присутствие низкоплотных флюидных включений в минералах свидетельствуют о том, что кристаллизация минералов вкрапленников изученных магматических серий Тродоса происходила в приповерхностных условиях при давлениях, не превышавших 1-2 кбар.

8.2 ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Примитивные магмы Тродоса характеризуются относительно окисленными условиями кристаллизации при fO_2 вблизи и выше буфера QFM. Наиболее высокая fO_2 (NNO+0.5) характерна для примитивных расплавов НПЛ и ВПЛ-1а. При кристаллизации расплавов всех типов наблюдается монотонное повышение fO_2 относительно линий буферных равновесий с понижением температуры.

8.1 ТЕМПЕРАТУРА И ДАВЛЕНИЕ

Температуры интрателлурической кристаллизации примитивных магм Тродоса определялись методом гомогенизации расплавных включений в минералах вкрапленниках по методике, описанной в Главе 3. Соотношение между $T_{\text{гом}}$ расплавных включений и составами вмещающих их минералов приведены на Рис. 6. Измеренный температурный интервал интрателлурической кристаллизации Ol НПЛ составил $1145-1210^\circ\text{C}$ ($Fo_{85.8-91.6}$). Для Ol ВПЛ типов 1а и 1б эти интервалы составляют, соответственно, $1195-1315^\circ\text{C}$ ($Fo_{88.9-91.9}$) и $1215-1380^\circ\text{C}$ ($Fo_{89.4-93.2}$). При одинаковой магнезиальности кристаллизующегося Ol расплавы ВПЛ существенно более

8.3 СОСТАВ ПРИМИТИВНЫХ РАСПЛАВОВ

8.3.1 Главные элементы

Содержание петрогенных элементов в расплаве определялось прямым анализом гомогенизированных расплавных включений в *Ol* и *Срх*, а также закаленных при известной температуре и тонко раскристаллизованных в природных условиях расплавных включений в *Sp*. Магмы, захваченные в виде включений, широко варьируют по содержанию *MgO* и образуют непрерывный ряд составов от ультрамафических до андезитовых (Рис. 7). Наиболее магнезиальные расплавы с содержанием *MgO*, достигающим 20-22 мас.%, были установлены в типах ВПЛ-16 и 2. Максимальная концентрация *MgO* в магмах ВПЛ-1а составляет около 16 мас.%, в магмах НПЛ -10.5 мас.%. Составы наименее магнезиальных расплавных включений отвечают составам закалочных стекол пород соответствующих типов.

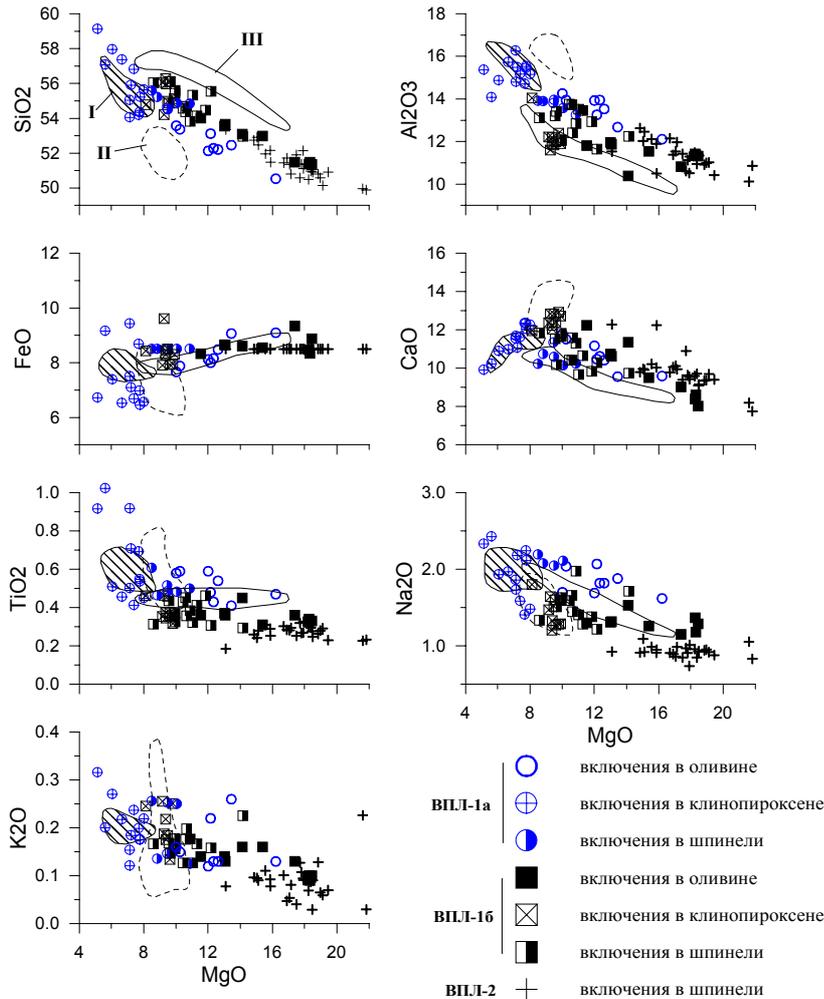


Рис. 7 Составы гомогенизированных и стекловатых расплавных включений в минералах ВПЛ. Поля: I - составы стекол ВПЛ района Марги; II - составы расплавных включений НПЛ; III - составы гомогенизированных расплавных включений в оливине и ортопироксене из бонинитов желоба Тонга [Sobolev, Danyushevsky, 1994].

При одинаковом *MgO* расплавы НПЛ демонстрируют систематически более высокие содержания *CaO*, Al_2O_3 и более низкие *FeO*, SiO_2 по сравнению с ВПЛ. Тренды составов расплавных включений из ультрамафических ВПЛ соответствуют 15-20% кристаллизации *Ol* (+*Sp*), к которому при *MgO*~8 мас.% присоединяется *Срх*. Составы примитивных расплавов НПЛ контролируются совместной кристаллизацией *Ol* и *Срх*, к которым присоединяется *Pl* при *MgO*~8 мас.%. Вариации в составах примитивных расплавов ВПЛ полностью согласуются с различиями в составе пород и стекол различных геохимических типов (см. выше), что со всей очевидностью указывает на то, что различия в составах ВПЛ связаны с различиями в составе наиболее примитивных магм.

Расплавы НПЛ по содержанию петрогенных элементов могут быть охарактеризованы как низкокалиевые островодужные толеиты и являются промежуточными по составу между магнезиальными ТОР, с одной стороны, более кремнекислыми типично островодужными магмами бонинитового типа. Близкими аналогами ВПЛ по содержанию петрогенных компонентов являются высококальциевые бониниты [Sobolev, Danyushevsky, 1994]. К общим особенностям ВПЛ и бонинитов относится сочетание высокой магнезиальности расплавов, повышенного содержания SiO_2 , H_2O (см. ниже), пониженных Al_2O_3 , CaO по сравнению с ТОР.

Общей особенностью расплавных включений ВПЛ и НПЛ являются широкие вариации несовместимых элементов (K, Na, Ti) в расплавах, захваченных в наиболее магнезиальные вкрапленники оливина и хромистой шпинели узкого интервала составов. Этот факт не может быть результатом фракционной кристаллизации оливина и/или клинопироксена и указывает на смешение различных по составу магм на ранних стадиях кристаллизации магматических серий Тродоса.

8.3.2 Элементы-примеси

Составы расплавных включений, захваченных высокомагнезиальным *Ol* и *Sp*, показаны на Рис. 8. Основная популяция включений расплавов различных геохимических типов тяготеет к соответствующим им по типу полям пород. Средние содержания РЗЭ во включениях также близки к составам пород. Этот факт демонстрирует несомненное генетическое родство расплава, зафиксированного в составе пород и представляющего позднюю стадию эволюции магматических систем, и расплавов, захваченных во включения на ранней стадии этой эволюции.

В то же время, обращают на себя внимание огромные вариации содержания наиболее несовместимых элементов (легких и средних РЗЭ, Ba, Sr, Zr) во включениях, установленные во всех детально изученных образцах типов НПЛ, ВПЛ-1 и ВПЛ-2 (Рис. 8). Во включениях присутствуют расплавы как гораздо более обедненные несовместимыми элементами, по сравнению с породами, так и наоборот, более обогащенные. Например, отношение $[\text{La}/\text{Sm}]_n$ в расплавах НПЛ варьирует почти в 20

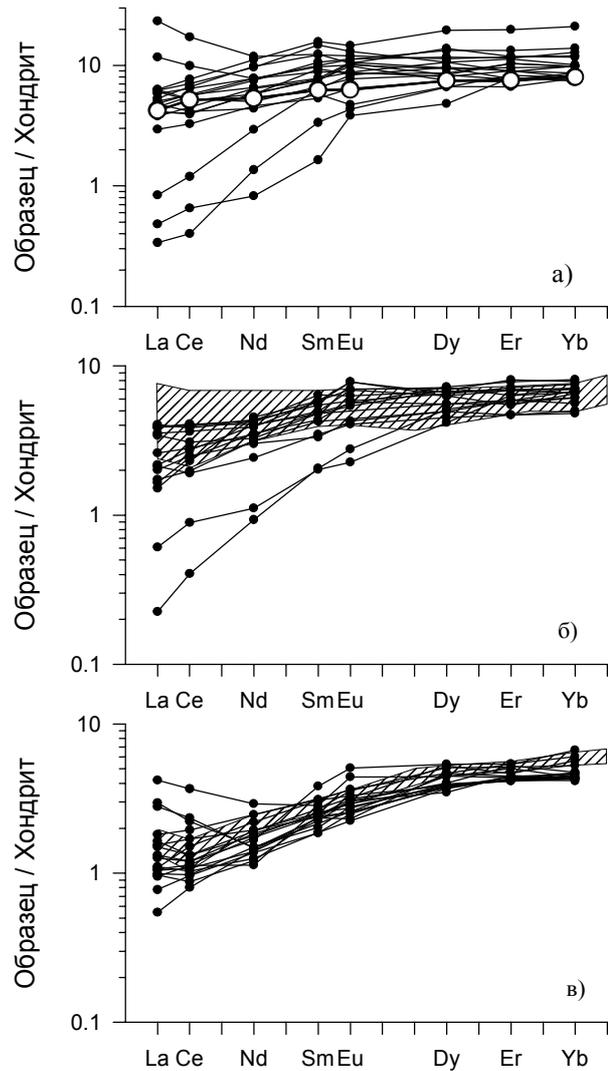


Рис. 8 Нормализованные содержания РЗЭ в расплавных включениях. Нормировка к составу хондрита по [Anders, Grevesse, 1989]. а) Включения в оливине НПЛ ($\text{Fo} > 88$ мол.%). Пустыми кружками показан состав закалочного стекла (TRV-42) из потока пикритовых пиллоу-лав; б) Включения в оливине ВПЛ -1а и б; в) Включения в хромшпинелиде из даек типа ВПЛ-2. На рисунках б) и в) поля соответствуют составам пород соответствующих типов.

раз, от 0.1 в ультраобедненном расплаве, до 1.9 в обогащенном. Близкая картина наблюдается и для расплавных включений в минералах ВПЛ. По содержанию петрогенных элементов расплавы различной степени обедненности практически не различаются.

Нормализованные к составу примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989] спектры содержаний несовместимых элементов в большинстве расплавных включений демонстрируют явные признаки надсубдукционного происхождения магм Тродоса. Это проявляется в четких максимумах нормализованных содержаний литофильных элементов с большим ионным радиусом (Ba, K, Sr) относительно P3Э близкой степени несовместимости [McCulloch, Gamble, 1991]. Типичный для многих островодужных серий пород минимум концентраций Nb относительно La и K характерен для расплавов НПЛ. В то же время для всех типов пород обнаружены расплавы, в которых отношения элементов близкой степени несовместимости K/Nb, K/La и Sr/Nd, нормализованные к составу примитивной мантии, имеют недифференцированные значения близкие к 1. В этих расплавах геохимические признаки их надсубдукционного происхождения отсутствуют и на основании только содержаний элементов-примесей они неотличимы от магм, которые могли образоваться в обстановке СОХ или океанических островов [Sun, McDonough, 1989]. Единственным принципиальным отличием расплавов Тродоса является высокое первичное содержание $H_2O > 1$ мас.%, установленное во всех расплавах вне зависимости от степени обогащенности литофильными элементами с большим ионным радиусом.

Расплавы, сильно отклоняющиеся от полей составов пород, были установлены только в наиболее магнезиальных минералах каждого типа ($Fo > 88$ мол.%), что совпадает с данными изучения TOP [Sobolev, Shimizu, 1994]. Более дифференцированные расплавы полностью соответствуют по составу породам. Этот факт можно интерпретировать как результат захвата в виде включений геохимически разнообразных родоначальных расплавов магматических серий Тродоса, существовавших на самых ранних стадиях кристаллизации. На поздних стадиях геохимическое разнообразие магм было в значительной степени стерто процессами смешения. Вероятно, что состав пород и стекол определялся именно составом продуктов смешения [Sobolev, Shimizu, 1994].

8.3.3 Летучие компоненты

Главным летучим компонентом магм Тродоса являлась H_2O . Данный факт подтверждается прямым анализом расплавных включений, присутствием в минералах существенно водных флюидных включений, систематической разницей между температурами закалки включений и расчетными псевдоликвидусными температурами, высоким содержанием H_2O в базальтовых стеклах. Содержания H_2O в примитивных расплавах Тродоса варьирует от 1 до 3 мас.%. Минимальные концентрации, не превышающие 2 мас.%, характерны для расплавов НПЛ. Расплавы ВПЛ характеризуются, в целом, более высокими содержаниями H_2O . В ряду ВПЛ 1а-1б-2 наблюдается последовательное повышение максимальных и средних значений содержания H_2O (или H_2O/Al_2O_3) с увеличением степени обедненности магм Ti. Среди стекол подобная зависимость отсутствует. Максимальные значения H_2O/Al_2O_3 в стеклах всех геохимических типов не превышают 0.17, тогда как во включениях типов ВПЛ-2 и 3 это отношение достигает величины 0.25 и более, что свидетельствует

о существенной дегазации магм типов ВПЛ-2 и 3 к моменту заковки и непригодности составов вулканических стекол этих типов для оценки содержания H_2O в родоначальных магмах.

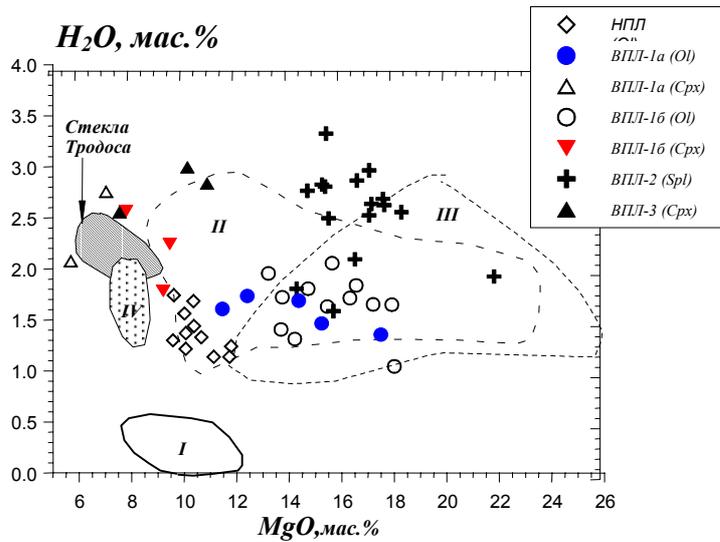


Рис. 9 Содержания H_2O и MgO в расплавных включениях из разных геохимических типов пород Тродоса. Минерал-хозяин указан в скобках в легенде. Полями околонуены составы расплавных включений из лав различных геодинамических обстановок [Sobolev, Chaussidon, 1996]: I - базальты срединно-океанических хребтов разных районов САХ и ВТП, II - высоко-Са бониниты дуги Тонга и разлома Хантер, III - низко-Са бониниты Н. Каледонии, о. Бонин, мыса Кейп-Фогель, IV - островодужные толеиты разлома Хантер.

ярко это проявляется для ультраобедненных несовместимыми элементами расплавов (Рис. 8). Например, отношение H_2O/K_2O в расплавах Тродос, ультраобедненных наиболее несовместимыми элементами достигает величин >100 , что не имеет аналогов среди известных составов мантийных магм. Расплавы с экстремально высокими отношениями H_2O к литофильным несовместимым элементам установлены во всех геохимических типах пород Тродоса.

Содержание хлора в базальтовых стеклах и большей части расплавных включений составляет от 200 до 500 г/т (в среднем 320 г/т) и хорошо коррелирует с содержаниями наиболее несовместимых элементов (например, К, La). Эти концентрации несколько выше, по сравнению с примитивными ТОР обедненного типа (<100 г/т [Michael and Schilling, 1989]) и близки к характерным концентрациям в стеклах базальтов задуговых спрединговых центров [Aggrey et al., 1988 и др.]. Наиболее высокие концентрации Cl характерны для ВПЛ (в среднем 350 г/т), магмы НПЛ несколько беднее этим компонентом (в среднем 250 г/т). Отношение H_2O/Cl варьирует от 10 до 900, однако средние значения H_2O/Cl для стекол и включений близки к среднему составу морской воды и составу примитивной мантии (~ 50) [Jambon, 1994].

Максимальные концентрации серы установлены в примитивных магмах НПЛ - в среднем 700 г/т, ВПЛ содержат в среднем 300 г/т. Эти различия связаны с вариациями состава родоначальных магм Тродоса. Минимальные концентрации серы (менее 10 г/т) установлены в наиболее обедненных несовместимыми элементами расплавах. При фракционировании магм наблюдается понижение концентрации S до 200 г/т в

Наиболее близкими аналогами расплавов Тродоса по содержанию H_2O являются бониниты и толеиты островных дуг. Особо следует отметить высокие концентрации H_2O во включениях из пород типа ВПЛ-2, достигающие 3 мас.% при $MgO=16-18$ мас.%, что является в настоящее время максимально известной концентрацией для столь примитивных магм [Sobolev, Chaussidon, 1996].

Концентрация H_2O в расплавах Тродоса находится на практически постоянном уровне и не коррелирует с содержаниями несовместимых элементов, которые варьируют в примитивных расплавах на порядок величин. Особенно

дацитах, что связано с дегазацией этого компонента при кристаллизации в окисленных условиях.

9. ПЕРВИЧНЫЕ МАГМЫ

9.1 КРИТЕРИИ ПЕРВИЧНОСТИ МАГМ

Первичным мантийным расплавом принято считать тот расплав, который находился в равновесии с мантийным источником при определенных P-T условиях. Доказать данный факт для конкретного природного расплава практически невозможно. Однако, для части расплавов может быть доказана их потенциальная возможность равновесия с мантией и, следовательно, эти расплавы могут рассматриваться как потенциально первичные [Соболев, 1996]. В работе различаются составы интегральных первичных магм, зафиксированные в составе пород и стекол, и составы дифференциальных первичных магм, состав которых могут отражать расплавные включения, избежавшие смешения в макросистеме.

Из приведенного выше материала очевидно, что существовали не один, а целая серия первичных расплавов различного состава, связанных с лавами северного Тродоса. Для того, чтобы установить состав этих первичных расплавов, необходимо определить первичную ликвидусную ассоциацию для каждого из них. В случае мантийных магм и расплавов Тродоса, в частности, задача сводится к определению состава ликвидусного оливина, так как расплавы имели *Ol*-содержащий источник, а экспериментально установлено, что поле стабильности оливина расширяется с уменьшением давления [Duncan and Green, 1987]. Максимальная оценка магнезиальности ликвидусного *Ol* для исследованных лав была сделана по составу наиболее магнезиального *Ol* линии мантийной корреляции, равновесного с хромистым шпинелидом конкретного типа магм (Рис. 5) [Sobolev, Danyushevsky, 1994]. Для НПЛ этот оливин соответствует ~Fo93, для ВПЛ-1а - Fo93.5, для ВПЛ-1б и 2 - Fo94.

9.2 СОСТАВ ПЕРВИЧНЫХ МАГМ

Составы интегральных первичных расплавов равновесных с установленной ликвидусной ассоциацией минералов были определены, используя в качестве исходных для расчета составы ультрамафических лав и усредненные составы гомогенизированных включений в высокомагнезиальном *Ol* и *Sp*. Содержания несовместимых элементов и H₂O были рассчитаны на основе составов ультрамафических лав, примитивных стекол и включений, исходя из допущения о постоянстве отношений концентраций несовместимых элементов к Al в процессах кристаллизации и кумуляции мафических фаз (*Ol ± Sp*).

Оцененные составы первичных расплавов показаны в Таблица 1. На основании формальной классификации составы расплавов относятся к типу низкоглиноземистых оливиновых базальтов [Магматические..., 1983]. В то же время расплавы характеризуются высокими абсолютными содержаниями MgO до 21 мас.%, что в сочетании с повышенным содержанием SiO₂~50 мас.% указывает на бонинитовую специфику их составов [Crawford et al., 1989]. Отметим, что высокое содержание MgO в первичных магмах ВПЛ значительно превышает сделанные ранее оценки [Cameron, 1985; Duncan and Green, 1987]. Наибольшие различия наблюдаются в составе интегральных первичных магм НПЛ и ВПЛ. Первичные расплавы НПЛ имеют повышенные содержания CaO, Al₂O₃, пониженные FeO, MgO, H₂O. В ряду расплавов

разных геохимических типов ВПЛ с ростом MgO от типа ВПЛ-1а к ВПЛ-2 происходит уменьшение содержаний TiO₂, Na₂O, K₂O, возможно, Al₂O₃, содержание SiO₂, FeO, CaO остаются на постоянном уровне, концентрация H₂O повышается.

Таблица 1 Содержания петрогенных элементов и P-T условия образования интегральных первичных магм Тродоса

Оксиды	ВПЛ-1а	ВПЛ-1б	ВПЛ-2	НПЛ
SiO ₂ , мас. %	50.8	50.9	50.5	50.9
TiO ₂	0.43	0.31	0.25	0.41
Al ₂ O ₃	11.4	9.8	10.4	14.8
FeO*	8.2	8.4	8.4	6.4
MgO	18.2	20.7	20.5	12.8
CaO	9.0	8.4	8.9	13.2
Na ₂ O	1.55	1.12	0.85	1.21
K ₂ O	0.14	0.11	0.08	0.10
H ₂ O	1.5	2.0	2.6	1.3
K ₂ O/H ₂ O	0.08	0.05	0.03	0.07
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	26.4	31.9	41.7	36.0
Fo ликв., мол. %	93.5	94.0	94.0	93.0
Cr# Sp ликв.	0.71	0.77	0.78	0.60
T ликв., °C	1375	1400	1400	1280
P обр, кбар	~ 15±20			~10
T обр, °C	~1430±1500			~1350
Cr# Sp релита	~0.65	~0.7	~0.7	~0.55

9.3 P-T УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ МАГМ

Усредненные P-T параметры образования первичных расплавов Тродоса были определены, используя свойство проекции *Ol-Pl-Qz* базальтового тетраэдра отображать составы расплавов, равновесных при заданном давлении с лерцолитовой или гарцбургитовой ассоциацией независимо от особенностей их состава [Takahashi, Kushiro, 1983]. Учитывая эффект H₂O на оценку давления равновесия с оливин-ортопироксеновой ассоциацией (+3-5кбар на 1-3% мас H₂O в расплаве, [Danyushevsky et al., 1994]), давление образования оцененных первичных расплавов составляет 15-20 кбар для ВПЛ и ~ 10 кбар для НПЛ. Температуры образования первичных магм были рассчитаны исходя из экспериментально установленных

ликвидусных температур начала кристаллизации первичных магм с поправкой на давление образования, принимая наклон ликвидуса *Ol* ~5 °/кбар [Ford et al., 1983]. Полученные оценки составляют ~1350 °C для НПЛ и 1430-1500°C для ВПЛ. Реалистичность сделанных оценок P-T условий подтверждается экспериментальными данными [Danyushevsky et al., 1994], которые показали, что первичные магмы ВПЛ действительно могли быть в равновесии с гарцбургитовой ассоциацией при давлениях 15-17 кбар и температуре 1430-1470 °C.

10. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ПЕРВИЧНЫХ МАГМ ТРОДОСА

10.1 Эволюция P-T условий образования магм Тродоса

В большинстве моделей островодужного магматизма в качестве источника первичных магм предполагается мантийный источник толеитов океанических рифтов (например, [Plank, Langmuir, 1988]). В этом случае можно ожидать, что температуры и давления образования первичных магм Тродоса должны быть близки к таковым для нормальных океанических толеитов (1300-1400°C, 5-15 кбар по [Falloon and Green, 1987]), что и предполагалось предыдущими исследователями (например, [Cameron, 1985]). По оценкам этой работы такому требованию вполне удовлетворяют первичные расплавы НПЛ, образованные при температурах ~1350°C и давлении ~10 кбар. Близость мантийного источника НПЛ к источнику ТОР (либо толеитов окраинных морей) также подтверждается близким составом ликвидусного хромшпинелида и содержанием петрогенных элементов в примитивных расплавах.

Установленные в настоящей работе температуры и давления образования первичных расплавов ВПЛ (1430-1500°C, 15-20 кбар) значительно отличаются от таковых НПЛ и указывают на то, что при развитии магматизма на Тродосе условия магмогенерации эволюционировали от малоглубинных и низкотемпературных на раннем этапе к более высокотемпературным и глубинным на позднем. Установленные различия в температуре образования НПЛ и ВПЛ ~100-150°C при разнице в давлении 5-10 кбар не могут быть объяснены в рамках существующих моделей надсубдукционного мантийного клина, его термальной структурой и эволюцией [Davies, Stevenson, 1992], если бы первичные магмы НПЛ и ВПЛ были образованы при прогрессивном плавлении одного мантийного источника, как это предполагалось ранее [Duncan, Green, 1987; Cameron, 1985]. Об этом же свидетельствует и близкое отношение Al_2O_3/TiO_2 в первичных магмах НПЛ и ВПЛ, отражающее близкую общую степень плавления мантии для ВПЛ и НПЛ. Эти данные свидетельствуют в пользу существования различных мантийных источников НПЛ и ВПЛ. Для образования последних необходимо вовлечение в зону магмогенерации независимого мантийного источника с потенциальной температурой >1400°C, превышающей таковую для мантийного источника ТОР [McKenzie and Bickle, 1988]. Полученный результат совпадает с данными по первичным расплавам тихоокеанских бонинитов, для которых также предполагается температура образования выше 1450°C [Sobolev, Danuyshesky, 1994]. В качестве мантийного источника высокотемпературных первичных магм ВПЛ можно предположить источник внутриплитовых магм, прошедший ранние стадии частичного плавления. Температуры этого источника по данным [Wyllie, 1988; Соболев, Никогосян, 1994] существенно выше 1400°C, а характерные глубины первичного плавления превышают 60 км (более 20 кбар литостатического давления). Повторное плавление источника такого типа, вероятно, способно произвести ультрамафические расплавы с установленными для ВПЛ характеристиками.

10.2 ХАРАКТЕРИСТИКА НЕЗАВИСИМЫХ КОМПОНЕНТОВ МАНТИЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В настоящее время общепринята поликомпонентная модель образования магм, связанных своим происхождением с плавлением мантии над зонами субдукции (например, [Hawkesworth et al., 1993]). В предельно упрощенной модели мантийный источник надсубдукционных магм можно представить как “смесь” обедненного, собственно мантийного, компонента (компонент “D”) и обогащенного несовместимыми элементами компонента (компонент “E”), предположительно связанного своим происхождением с субдуцированной плитой. Корректная количественная оценка состава независимых компонентов является сложной геохимической задачей, поскольку состав ни одного из них *a priori* неизвестен. Традиционным подходом, который использовался ранее в ряде работ (например, [Stolper, Newman, 1994]) и применен в данной работе, является независимая оценка состава одного из конечных членов “смеси” - мантийного компонента. Когда такая оценка сделана, определение состава других компонентов значительно упрощается и становится возможным на основе расчета баланса масс.

10.2.1 Мантийный компонент (“компонент D”)

Мантийный компонент источника магм Тродоса вероятно представляет собой ультраосновное вещество ряда лерцолит-гарцбургит. Судя по различиям в составах

оцененных первичных расплавов, хромистости ликвидусных хромшпинелидов и Р-Т условиях образования первичных магм, состав этого компонента претерпевал существенные изменения в истории формирования Тродоса и его состав был, вероятно, различным для источника ВПЛ и НПЛ. Судя по значительной обедненности всех типов магм Тродоса несовместимыми элементами, можно с уверенностью утверждать, что мантийный компонент источника первичных магм был значительно обеднен базальтовым компонентом и уже испытывал предшествующие стадии плавления. На основе всего комплекса полученных в работе геохимических и минералогических данных, а также оцененных Р-Т условий образования первичных магм в качестве мантийного компонента источника НПЛ был принят состав обедненного лерцолита ($Ol_{63}Opx_{22}Cpx_{12}Sp_2$), представляющего собой рестит после 10% частичного плавления источника ТОР. В качестве мантийного компонента источника ВПЛ использовался состав обедненного лерцолита ($Ol_{69}Opx_{21}Cpx_8Sp_2$), представляющий собой рестит после 15% частичного плавления примитивной мантии.

10.2.2 Компонент, обогащенный группой наиболее несовместимых элементов и H_2O (компонент “Е”)

Таблица 2 Состав обогащенного компонента

Элементы	Среднее (n=15)	R отн. %
Cs, г/г	7.1	26.6
Cl, мас. %	1.4	38.9
Rb, г/г	153	26.8
Ba, г/г	629	29.8
Th, г/г	4.3	39.6
U, г/г	2.7	26.8
K ₂ O, мас. %	5.2	29.5
B, г/г	373	36.7
Nb, г/г	25.4	38.0
La, г/г	25.4	49.3
H ₂ O, мас. %	72.9	13.2
Ce, г/г	65	55.7
Pb, г/г	30.9	28.8
Sr, г/г	1708	31.8
Nd, г/г	40.2	59.9
Zr, г/г	415	49.7
Sm, г/г	10.8	55.9
Na ₂ O, мас. %	22.7	37.6
Eu, г/г	3.8	54.5
Ti, г/г	0	-
Dy, г/г	10.9	32.8
Y, г/г	15.9	51.7

неизвестные концентрации 22-х элементов в обогащенном компоненте, степень плавления (F) и количество обогащенного компонента в источнике (X_E). Постулировав содержание Ti в компоненте “Е” равным 0, система была решена аналитически для каждого состава первичного расплава. В работе показано, что расчетный состав обогащенного компонента слабо зависит от содержания в нем Ti,

Для количественной оценки состава компонента “Е” нами использовался подход, близкий к изложенному в работе [Stolper, Newman, 1994]. Изначально было предположено, что источник магм Тродоса представлял собой смесь мантийного и обогащенного компонентов с концентрациями i -элемента - C_0 и C_E , соответственно, который испытывал частичное плавление. Тогда концентрация i -элемента в первичном расплаве будет определяться уравнением: $C_i = \{[1 - X_E] * C_0 + X_E * C_E\} / \{D_0 + F * [1 - P] / [1 + X_E]\}$, представляющим собой комбинацию уравнения частичного немодального плавления [Shaw, 1970] и уравнения баланса масс компонентов в источнике, где X_E - количество обогащенного компонента. Содержания 22-х элементов-примесей в аккумулярованных первичных магмах были рассчитаны на основе 15 составов примитивных стекол, проанализированных высокоточным методом ICPMS-LAM, содержание H_2O - на основе составов расплавных включений. Для каждого состава первичного расплава была составлена система из 23 уравнений, включающая 22 уравнения баланса масс и уравнение суммы окислов элементов, равное 100 мас.%. Система содержала 24 неизвестных:

состава мантийного компонента, использованных коэффициентов распределения элементов и пропорций фаз в реакции плавления. Это объясняется в целом сильно несовместимым характером исследованных элементов, их высокими концентрациями в обогащенном компоненте, обедненным составом мантийного компонента и относительно высокими степенями плавления, необходимыми для образования магм Тродоса.

Оцененный состав компонента “Е” (Рис. 10, Таблица 2) характеризуется высоким содержанием H_2O , ее высоким отношением к легким РЗЭ, высоким содержанием Na_2O , выраженными максимумами нормализованных концентраций LILE, В, Рb, Cl, слабо обогащенным спектром нормализованных содержаний РЗЭ. Составы компонента “Е” близки для НПЛ и ВПЛ. В целом же, обогащенные компоненты магм Тродоса демонстрируют характер спектров, близкий к “богатому H_2O компоненту” в магмах Марианского трога [Stolper, Newman, 1994]. Компонент “Е” магм Тродоса отличается более резкими максимумами крупно-ионных литофильных элементов и пониженными концентрациями РЗЭ. Высокое некомпенсированное хлором содержание Na в обогащенном компоненте может свидетельствовать о значительной доли карбонатной составляющей в нем (например, $NaHCO_3$). Очевидно, что в компоненте “Е” присутствовала и неучтенная в расчете силикатная составляющая предположительно полевошпатового состава, количество которой могло составлять по меньшей мере 1-3 мас. % [Eggler, 1987; Ayers et al., 1997].

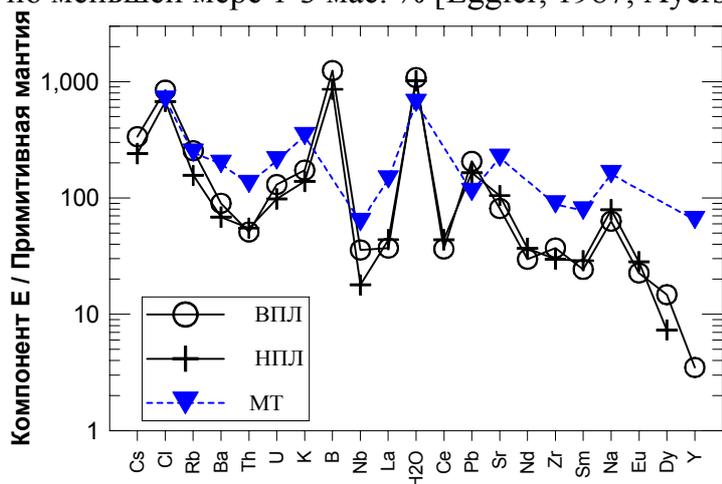


Рис. 10 Составы обогащенного компонента в мантийном источнике ВПЛ и НПЛ в сравнении с составом обогащенного компонента в источнике магм Марианского трога (МТ) [Stolper and Newman, 1994].

К числу элементов, на содержание которых в интегральных магмах компонент “Е” оказывает доминирующее влияние (вклад >90%), относятся Cs, Cl, Rb, Ba, K, U, Th, V, Рb, Nb и H_2O . Большой вклад (80-40%) компонент “Е” вносит в содержание легких РЗЭ, Sr, Zr и Na. На содержание остальных элементов (средние и тяжелые РЗЭ, Y и Ti) обогащенный компонент оказывает малое влияние либо вообще влияния не имеет. Их содержание определяется главным образом мантийным компонентом.

Принципиальная особенность оцененных составов компонента “Е” источника магм Тродоса заключается в разобщении H_2O с другими несовместимыми элементами. Данный факт установлен исходя из состава интегральных магм (стекла) и особенно ярко проявляется в составе дифференциальных магм (расплавные включения). При этом содержания несовместимых элементов в составах компонента “Е”, оцененных на основании различных составов первичных магм, хорошо коррелируют между собой и обратно коррелируют с содержанием H_2O . Основываясь на полученных зависимостях, состав компонента “Е” можно представить как смесь чисто водного компонента (обогащенный компонент “Е1”), с содержанием $H_2O \sim 100$ мас.% и компонента, определяющего баланс других несовместимых элементов в источнике магм (обогащенный компонент “Е2”). Судя по составу расплавных

включений, пропорции компонентов “Е1” и “Е2” в источнике первичных магм могли варьировать более чем в 100 раз.

10.3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПОНЕНТОВ В МАНТИЙНОМ ИСТОЧНИКЕ И ЕГО ЧАСТИЧНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ

10.3.1 Роль H_2O в образовании первичных магм

Парадокс образования первичных магм Тродоса состоит в том, что, с одной стороны, эти магмы были образованы при высоких температурах ($>1300^\circ C$) и при высоких степенях плавления мантийного источника и в то же время характеризуются высоким содержанием H_2O . Если два первых свойства хорошо сочетаются и могут свидетельствовать о предшествующих процессах плавления мантийных источников лав Тродоса, то сохранение H_2O в столь высокотемпературном мантийном веществе, которое уже было ранее вовлечено в процессы частичного плавления, составляет непреодолимую трудность [Sobolev, Danyushevsky, 1994]. Разрешение этого парадокса заключается в том, что H_2O была инъецирована из внешнего источника в "сухой" высокотемпературный источник непосредственно перед образованием первичных магм. Более того, логично предположить, что H_2O -содержащий компонент и явился инициатором плавления, вследствие понижающего влияния H_2O на температуру солидуса перидотита [Green, 1973; Tatsumi, 1989]. Если привнос H_2O был основной причиной частичного плавления мантийных источников магм Тродоса, то количество H_2O в источнике и степень плавления мантии должны быть взаимосвязанными параметрами. Это полностью подтверждается полученными данными. Для магм типа ВПЛ-1 расчетная степень плавления составляет 10-15% и количество H_2O в источнике 0.1-0.3 мас.%, для типа ВПЛ-2 - 15-20% и 0.3-0.6 мас.%, для типа ВПЛ-3 - $>20\%$ и более 0.6 мас.%, соответственно. Величина отношения степени плавления к количеству H_2O в источнике для магм Тродоса составляет от 40 до 100, что находится в соответствии с экспериментальными данными [Green, 1973; Hirose, 1997]. Это соответствие показывает, что доминирующей причиной плавления мантии Тродоса могло быть понижающее влияние H_2O на температуру солидуса перидотита. Такой процесс можно охарактеризовать как индуцированное компонентом плавление. Отметим, что этот процесс не требует существенного привлечения дополнительной энергии, например реализующейся при декомпрессии мантии, что предполагалось ранее для островодужных магм [Pearce, 1995; Plank, Langmuir, 1993].

Выше отмечалось, что с уменьшением возраста степень обедненности ВПЛ увеличивается. Простой интерпретацией этого факта является то, что ВПЛ представляют продукты непрерывного прогрессивного плавления одного мантийного источника. В рамках модели индуцированного плавления это подразумевает постоянный привнос в источник H_2O , стимулировавшей продолжение плавления и образование магм все более и более обедненного состава.

10.3.2 Механизм плавления мантии

Для объяснения геохимической гетерогенности первичных магм Тродоса и наблюдаемой последовательности излияния лав была применена количественная модель индуцированного плавления мантийного вещества [Ozawa, Schimizu, 1995]. Полученные результаты показали, что весь спектр первичных магм Тродоса может быть объяснен как результат плавления двух исходных мантийных источников (различных для НПЛ и ВПЛ) под воздействием H_2O -содержащего компонента (Рис.

8). Составы большинства ультраобедненных расплавов, показанных на Рис. 8, могут быть объяснены плавлением мантии под воздействием компонента E1, то есть резко обедненными элементами относительно H_2O . Критическая масса расплава, которую мог удерживать рестит, оценена как $\geq 2\%$. Данные моделирования демонстрируют, что зона магмогенерации в надсубдукционных зонах может представлять собой проточную систему и быть постоянно открытой как для привноса H_2O -содержащего компонента, так и для частичного отделения новообразованного расплава от рестита. Составы пород являются продуктами смешения непрерывной серии первичных магм, образованных в результате различных стадий прогрессивного плавления мантийных источников. Смешение расплавов вероятно происходило в магматических камерах или в ходе транспорта магм от магмогенерирующего источника.

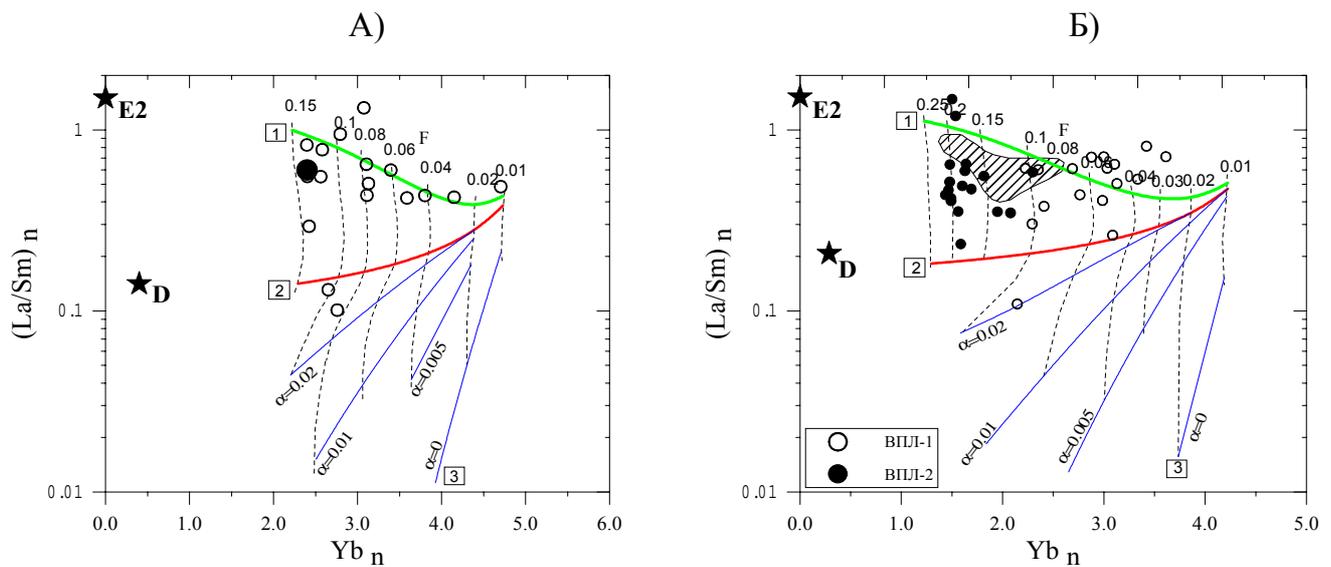


Рис. 11 Модель индуцированного плавления источников магм Тродоса. (А)- НПЛ и (Б) - ВПЛ. Мелкими значками показаны составы мгновенных первичных магм. Составы аккумулярованных магм показаны крупным кружком на рисунке (а) и полем на рисунке (б). “D” - состав мантийного источника, “E2” - состав обогащенного компонента. Сплошные линии: 1- плавление в закрытой системе, индуцированное компонентом “E” с пропорцией E1:E2=5; 2.- плавление в закрытой системе, индуцированное компонентом “E1”; 3.- плавление в открытой системе, индуцированное компонентом “E1” при различном количестве критического расплава в источнике α . Пунктирные линии соответствуют различным степеням плавления, величины которых в долях единицы показаны у верхней кривой. Функции плавления $F=f(X_{H_2O})$ были рассчитаны на основе базовой зависимости влияния количества H_2O на степень плавления, исходя из состава компонентов “E1” и “E2”, индуцирующих плавление. Расчет модели проводился по уравнениям [Ozawa, Shimizu, 1995].

10.4 ПРИРОДА ОБОГАЩЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Геохимические особенности компонента “E”, такие как повышенные относительно HFSE и PЗЭ содержания H_2O , LILE, B, Th и U, низкое Th/U, повышенное отношение $^{208}Pb/^{204}Pb$ [Rautenschlein et al., 1985], свидетельствуют, что наиболее вероятно его источником была субдуцированная океаническая плита с примесью осадочного материала. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными подвижности различных элементов в процессе дегидратации субдуцированной океанической плиты [Kogiso et al., 1997]. Наиболее значительные вариации состава компонента-E наблюдаются по содержанию H_2O относительно других несовместимых элементов. Эти вариации были охарактеризованы как результат смешения двух компонентов “E1” и “E2”. Учитывая контрастность состава этих компонентов, очевидно, что они не могут происходить из источника одного

состава, и в геохимическом смысле “Е1” и “Е2” могут быть охарактеризованы как независимые компоненты. Полученные данные по составу интегральных магм показывают, что количество привнесенных в мантийный источник компонентов “Е1” и “Е2” являются в целом скоррелированными параметрами и, следовательно, наиболее вероятно поступали в мантийный источник одновременно в составе единого обогащенного H_2O и несовместимыми элементами компонента. Существенные вариации относительных пропорций “Е1” и “Е2” в составе этого обогащенного компонента, установленные в составе дифференциальных магм, могут быть объяснены, как результат просачивания водного флюида через гетерогенно-метасоматизированную компонентом “Е2” мантию на пути миграции к источнику магм Тродоса [Davies, Stevenson, 1992] либо как результат комбинированного транспорта флюида путем просачивания и по трещинам [Davies, Rawland, 1997]. Образующийся в этом процессе флюид/расплав будет содержать разные соотношения компонентов “Е1” и “Е2” в зависимости от степени метасоматоза мантийного вещества либо в зависимости от степени реакционного взаимодействия, которая определяется механизмом миграции флюида. Оцененные в работе средние составы H_2O -содержащего компонента “Е” отражают интегральный результат такого взаимодействия.

10.5 ТРАНСПОРТ МАГМ К ПОВЕРХНОСТИ

Обнаруженные в этой работе большая гетерогенность составов примитивных магм и, в том числе, ультраобедненные расплавы позволяют предположить, что эти расплавы избежали перемешивания и взаимодействия с вмещающими породами до захвата в виде включений в минералы и могут отражать состав первичных магм Тродоса. Смешение этих расплавов наиболее вероятно происходило уже в магматическом очаге и, следовательно, транспорт первичных магм из зон магмогенерации преимущественно осуществлялся по каналам с ограниченным взаимодействием с вмещающими породами. Подобный механизм миграции магм предполагает относительно быстрое их перемещение из зоны частичного плавления в коровые условия. Данные, полученные для современных островодужных магм на основе систематики Th-Ra изотопных отношений, свидетельствуют, что скорость перемещения магм составляла по меньшей мере 35-70 м/год [Turner, Hawkesworth, 1997], что согласуется с выводами данной работы. Очевидным фактором, стимулировавшим быстрый подъем магм из мантии, является высокое содержание в них H_2O , значительно понижающей вязкость силикатных расплавов [например, Кадик и др., 1971].

11. ПЕТРОЛОГО-ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ОФИОЛИТОВОГО КОМПЛЕКСА ТРОДОС

Образование офиолитового комплекса связано с развитием магматизма над одной из субдукционных зон палеоокеана Тетис, заложение которых было, вероятно, вызвано режимом сжатия в результате начала конвергенции Африканского и Евразийского континентов в поздне меловое время (после 120 млн. лет назад). Субдукция океанической коры в мантию и ее последующая дегидратация инициировали магматическую активность на Тродосе. На первом этапе была образована главная часть офиолитового разреза, включающая НПЛ, комплекс параллельных даек и большую часть кумулятов. Образование первичных магм

происходило в результате повторного плавления мантийного источника ТОР при давлении ~ 10 кбар и температуре $\sim 1350^\circ\text{C}$. Присутствие развитого комплекса параллельных даек свидетельствует о том, что этот этап магматизма на Тродосе проходил в режиме растяжения литосферы.

Второй этап магматизма Тродоса отмечен инициацией мантийного источника ВПЛ. Первичные магмы этого этапа были образованы в результате внедрения в мантийный клин над зоной субдукции горячего диапира (мантийной струи) и его повторным плавлением при давлениях 15-20 кбар и температурах $1430-1500^\circ\text{C}$. В определенный период времени предполагается сосуществование обоих мантийных источников, глубинного (65-80 км) и относительно малоглубинного (35-50 км), что приводило к образованию магм промежуточного состава. На заключительном этапе магматизма Тродоса происходило дальнейшее плавление глубинного источника и его прогрессирующее истощение несовместимыми элементами. Последовательно образовывались магмы ВПЛ различной степени обедненности. Конкретным механизмом проникновения горячего диапира в мантийный клин могло быть его внедрение в “окно”, образованное смещением сегментов субдукционной зоны по трансформному разлому (например, по разломной зоне Аракапас), по аналогии с моделью образования бонинитов Тонга [Danyushevsky et al., 1995]. Альтернативно, в результате коллизии субдукционной зоны с пассивной континентальной окраиной [Davies, von Blanckenburg, 1995] мог просходить отрыв субдуцированной океанической плиты от континентальной (“slab breakoff”) и мантийный диапир мог проникнуть в образующееся в плите “окно”. После короткого периода образования ВПЛ произошло отмирание субдукционной зоны Тродоса (около 90 млн. лет назад). Общий интервал образования офиолитовой коры может быть оценен как менее 20 млн. лет.

Изложенная выше модель образования литосферы Тродоса имеет только предположительный характер и представляет собой попытку логично связать новые петролого-геохимические и геологические данные в рамках единой концепции. Будущие исследования покажут насколько такая модель реалистична. Вероятно, будут предложены и новые альтернативные сценарии тектоно-магматической эволюции Тродоса.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На основе изучения минералогии, геохимии пород и стекол, магматических включений в минералах, термометрических экспериментов, а также методов математического моделирования магматического процесса проведено детальное исследование условий образования и эволюции магматических серий лавового и дайкового комплексов офиолитов Троодос. Полученные данные позволяют сформулировать следующие защищаемые положения:

1. Определены составы родоначальных магм полного разреза вулканических пород офиолитов Троодос. Породы верхней и нижней частей лавового комплекса являются производными различных по составу, условиям образования и кристаллизации первичных магм надсубдукционного происхождения. Интрателлурическая кристаллизация всех типов магм Троодоса происходила при давлениях около 1 кбар в условиях близких к насыщению водным флюидом.

2. Первичные расплавы нижних пиллоу-лав отвечали по составу низко-калиевым островодужным толеитам и содержали около 13 мас.% MgO и 1.3 мас.% H₂O и были образованы при давлениях ~10 кбар и температуре ~1350°C в результате повторного плавления над зоной субдукции источника толеитов океанических рифтов. Первичные расплавы верхних пиллоу-лав имеют состав промежуточный между островодужными толеитами и высококальциевыми бонинитами и характеризуются прогрессивным обеднением несовместимыми элементами во времени. Они содержали 18-22 мас.% MgO, 1.5-2.5 мас.% H₂O и были образованы при давлениях более 15 кбар и температурах свыше 1400°C в результате плавления обедненного мантийного источника, инициация которого произошла на заключительном этапе магматизма Троодоса.

3. Образование первичных магм Троодоса происходило в результате воздействия H₂O-содержащего компонента субдукционного происхождения на “сухое” горячее мантийное вещество. Зона магмогенерации Троодоса представляла собой открытую систему для привноса H₂O-содержащего компонента и для частичного отделения новообразованного расплава от рестита. Составы пород являются продуктами смешения непрерывной серии первичных магм, образованных в результате различных стадий прогрессивного плавления мантийных источников.

4. Предложена модель оценки состава субдукционного компонента в мантийном источнике магм Троодоса. Показано, что субдукционный компонент характеризуется высокими концентрациями H₂O, крупно-ионных литофильных элементов, В, Рb, Сl и Na, относительно РЗЭ и близок по составу к флюидной фазе, образующейся при дегидратации субдуцированной плиты.

Список работ по теме диссертации

1. Портнягин М.В., Соболев А.В. (1993) Геохимическая зональность лавового комплекса офиолитов Троодос (о.Кипр). *Докл. РАН*, т.329, №3, с.352-356.
2. Портнягин М.В., Каменецкий В.С., Соболев А.В., Данюшевский Л.В., Дмитриев Л.В. (1993) Новый тип первичных магм офиолитового комплекса Троодос (о.Кипр). *Докл. РАН*, т.333. №3. с.370-375
3. Соболев А.В., Портнягин М.В., Дмитриев Л.В., Цамерян О.П., Данюшевский Л.В., Кононкова Н.Н., Шимизу Н., Робинсон П. (1993) Петрология ультрамафических лав и ассоциирующих пород массива Троодос, о. Кипр. *Петрология*, т. 1, №4, с.379-412
4. Соболев А.В., Цамерян О.П., Портнягин М.В., Каменецкий В.С., Данюшевский Л.В., Дмитриев Л.В., Жорон Ж.-Л. (1993) Ультрамафические магмы офиолитового массива Троодос (о.Кипр). Геохимия и минералогия. *Геохимия*, №2, с. 189-206.

5. Портнягин М.В., Магакян Р., Шминке Х.-У. (1996) Геохимическое разнообразие бонинитовых магм по данным изучения магматических включений в высоко-магнезиальном оливине из лав юго-западного Кипра. *Петрология*, т.4, №3, с.250-265.
6. Соболев А.В., Мигдисов А.А., Портнягин М.В. (1996) Распределение примесных элементов между клинопироксеном и базальтовым расплавом: по данным исследования расплавных включений в минералах массива Троодос, о-в Кипр. *Петрология*, т.4, №3, с.326-336.
7. Portnyagin M.V., Danyushevsky L.V., Kamenetsky V.S. (1997) Coexistence of two distinct mantle sources during formation of ophiolites: a case study of primitive pillow-lavas from the lowest part of the volcanic section of the Troodos Ophiolite, Cyprus. *Contrib. Mineral. Petrol.*, V.128, No 2/3, pp.287-301.
8. Portnyagin M.V. (1998/1999) Volcanic and Sheeted-Dyke Complexes of the Troodos ophiolite. In: V.A.Krashennikov, F.Hirsh, J.Hall (Eds) "*Geological Structure of the Eastern Mediterranean*", University of Yerusalem, Beer Sheva, Israel (in press).
9. Портнягин М.В., Соболев А.В. (1992) Геохимическая зональность "верхних" пиллоу-лав офиолитового комплекса Троодос (о.Кипр). *Геология морей и океанов*. Тезисы докладов 10 Международной школы морской геологии. Том.2. с.192.
10. Портнягин М.В., Соболев А.В., Каменецкий В.С., Дмитриев Л.В., Данюшевский Л.В., Жорон Ж.-Л. (1992) Высокомагнезиальный островодужный толеит - родоначальный расплав "нижних" пиллоу-лав офиолитов Троодос (о.Кипр). *Геология морей и океанов*. Тезисы докладов 10 Международной школы морской геологии. Том.2. с.193-194.
11. Portnyagin M.V., Kamenetsky V.S., Sobolev A.V. (1993) A possible parental melt of lower section of Troodos lava sequence: evidence from melt inclusions study. *EUG VII Abstracts* No1, TERRA nova, v.5, p.69.
12. Sobolev A.V., Portnyagin M.V., Dmitriev L.V., Tsameryan O.P., Danyushevsky L.V., Shimizu N., Kononkova N.N. (1993) Petrology of ultramafic lavas of the Troodos massif, Cyprus. . *Experiment in geosciences* (Abstracts). V.2. N3. P.56.
13. Portnyagin M.V., Sobolev A.V. (1994) The crystallization temperature of primitive melts from the Troodos lava sequence (Cyprus). *PACROFI V abstracts*, Cuernavaca, Mexico, p. 74-75.
14. Portnyagin M.V., Sobolev A.V., Dmitriev L.V., Danyushevsky L.V. (1994) Primitive melts of the Troodos ophiolite (Cyprus) trapped as inclusions by chromium spinels. *16th General Meeting IMA*, Pisa, 334 Rome, Italy, p.36
15. Portnyagin M.V., Sobolev A.V. (1995) Melting beneath immature island arc: Evidence from melt inclusions study of Cyprus volcanics. *Eos Trans. AGU*, 76(17) Spring Meet Suppl., p.S267
16. Hansteen T.H., Portnyagin M.V., Sobolev A.V. (1995) Volatiles in Troodos glasses: Deep-sea degassing or geochemical signatures of primary melts? *Int. Ophiolite Simp.*, Pavia, p.60-61
17. Smirnov V.K., Sobolev AV, Batanova VG, Portnyagin M.V., Simakin S.G., Potapov G.V. (1995) Quantitative SIMS analysis of melt inclusions and host minerals for trace elements and H₂O. *Eos Trans. AGU*, 76(17) Spring Meet Suppl., p.S270
18. Portnyagin M.V., Sobolev A.V. (1995) Component mixing in the source of island-arc magmas: melt inclusions study of a single sample from the Troodos ophiolite (Cyprus). *5th Zonenshain Conference on Plate Tectonics*. (Moscow, November 22-25, 1995). p.21.
19. Портнягин М.В. (1997) Вовлечение различных мантийных источников в образование магм над зонами субдукции: данные изучения примитивных лав массива Троодос, о.Кипр. *ГЕОХИ 50 лет. Тезисы докладов молодых ученых*, с.11-12.
20. Portnyagin M.V., Ariskin A.A., Sobolev A.V. (1997) Fractional crystallization of island-arc tholeiites: numerical simulation of the natural liquid line of descent. *Experiment in geosciences* (Abstracts) (in press).