

На правах рукописи

ПЛЕЧОВ Павел Юрьевич

**МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ИСТОЧНИКОВ ОСТРОВОДУЖНЫХ МАГМ
И ДИНАМИКА ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Специальность
25.00.04 – петрология, вулканология

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2008 г.

**Работа выполнена на кафедре петрологии геологического факультета
Московского Государственного Университета им. М.В.Ломоносова (МГУ).**

Официальные оппоненты – академик РАН, доктор геолого-минералогических наук

Когарко Лия Николаевна

доктор геолого-минералогических наук
Геншафт Юрий Семенович

доктор геолого-минералогических наук
Гирнис Андрей Владиславович

Ведущая организация – Институт вулканической геологии и геохимии
Дальневосточного отделения РАН (г. Петропавловск-Камчатский)

Защита состоится 7 ноября 2008 г. в 14-30 в ауд. 415 на заседании диссертационного совета Д.501.001.62 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, геологический факультет

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ГЗ, 6 этаж).

Автореферат разослан __ октября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.62
доктор геолого-минералогических наук

В.И.Фельдман

Огромное количество научных публикаций по эволюции надсубдукционных зон затрагивают практически все области геологии, демонстрируя сложность и разнообразие протекающих в них процессов. Благодаря современным методам исследований, в том числе и численному моделированию в последние десятилетия накоплен принципиально новый фактический материал. Он требует переосмысления многих положений, закрепившихся в науке с 1960-1970 гг. Особенное значение приобрела проблема наличия единого островодужного типа магм с общим источником их генерации. Наряду с островодужными известково-щелочными и толеитовыми базальтами были описаны другие типы островодужных магм [Crawford, 1989; Defant, Drummond, 1990; Волынец, 1995]. Необходимо не только определить место этих источников в конкретной геодинамической обстановке, но и создать модель динамики подъёма магм к поверхности, их фракционирования и смешения с магмами различных источников.

Процессы, происходящие в островодужной системе, приводят к образованию максимального среди всех известных геотектонических обстановок разнообразия вулканических серий. Во многом оно объясняется различием в степени метасоматоза мантии и вариаций в механизмах плавления мантии надсубдукционного клина [Gill, 1981; Pearce and Peate, 1995; Portnyagin et al., 2007], а также возможного плавления субдуцированной плиты [Jogodzinsky et al., 1996]. При этом огромную роль в формировании вулканических серий играют процессы смешения магм [Eighelberger, 1978, Sakyama, 1979, Иванов, 1990].

В настоящей работе показана возможность существования нескольких источников магм в нижней части островодужной коры. Их существование и развитие доказаны и охарактеризованы на примерах конкретных объектов в свете общей эволюции островодужной системы. В данной работе, на примере конкретных островодужных магматических систем. Рассматривается их петрология, кинетика и динамика процессов смешения контрастных по составу расплавов, которые зачастую являются «триггерами» крупных вулканических извержений [Sparks et al., 1977].

Актуальность работы.

Актуальность данной работы определяется ключевой ролью островодужного вулканизма в понимании геологии и геодинамики процессов, происходящих в конвергентных зонах Земли. Островодужный вулканизм – отражение комплекса взаимосвязанных процессов в погружающейся гидратированной океанической плите. Среди них первостепенное значение

имеют (1) метаморфизм (2) дегидратация, (3) фильтрация потоков флюидов и расплавов в надсубдукционном мантийном клине, (4) частичное плавление мантии и островодужной коры и, наконец, (5) процессы гибридизации магм.

Цель и задачи работы.

Основные цели работы

- выявить и петрологически охарактеризовать основные типы островодужных серий нижнекорового происхождения,
- определить их вклад в общую эволюцию островодужного вулканизма,
- определить наиболее вероятный источник магмогенерации выделенных серий
- создать модель механизма гибридизации базальтов с кислыми магмами корового происхождения.

Эти цели предполагают решение следующих задач:

- 1) Выделение вулканических серий, типичных для зрелых островных дуг, определение их геологической позиции и приуроченности к этапам эволюции островодужных систем.
- 2) Петрологическая характеристика каждой из выделенных серий на примере конкретных объектов современного вулканизма. Выявление физико-химических условий эволюции исходных магм.
- 3) С привлечением результатов решения задач (1) и (2) изучить характер и механизмы гибридизма магм на примере долгоживущих вулканических систем островных дуг, а также определить признаки гибридизма, определить физико-химические параметры формирования магм и оценить вклады химического и механического механизмов смешения кислых и основных магм.
- 4) Провести численное петрологическое и гидродинамическое моделирование процессов смешения магм в конкретных вулканических системах с возможностью прогноза характера извержения и потенциальной опасности вулканической системы для жизнедеятельности населения островных дуг.

Фактический материал.

Для детального изучения петрологических особенностей магм, возникающих в различных зонах магмогенерации, идеально подходит *зрелая* островная дуга с большим геохимическим разнообразием серий одновозрастных пород. К таким дугам, в первую очередь, относится Курило-Камчатская островная дуга, результаты изучения которой лежат в основе работы. Результаты исследований разнообразных по условиям

магмогенерации и составу пород вулканических дуг Японии и Малых Антильских островов используются в данной работе в качестве тестов основных выводов работы.

В процессе работы использовались материалы, полученные автором в ходе полевых работ 1996-2007 гг в районах современного островодужного вулканизма Камчатки, Курил, Японии, Фиджи и Вануату. Для детальных петрологических исследований привлекался каменный материал с вулканов Суифриере Хиллз (Малые Антилы) и Сент-Хеленс (Каскадные горы), предоставленный коллегами из Бристольского университета.

Было исследовано около 850 шлифов вулканических пород с 135 вулканов и моногенных эруптивных центров, произведено около 6000 микронзондовых определений составов стекол и минералов. Было исследовано около 500 расплавных включений и проведены сотни закалочных экспериментов. Было получено около 80 определений рассеянных и летучих элементов в стеклах расплавных включений методами ионной масс-спектрометрии и LA-ICPMS.

Проведено 18 серий экспериментов по изучению минеральных равновесий в вулканических системах и кинетики реакций минерал-расплав.

Научная новизна и личный вклад автора.

Автором разработаны методы комплексного петрологического изучения вулканических серий, в основе которых лежит изучение расплавных и минеральных включений, усовершенствованы некоторые методы классической петрографии вулканических пород и впервые для таких вулканических объектов проведен анализ минеральных реакций с целью восстановления кинетических параметров вулканических систем.

В работе получены принципиально новые данные по составам и условиям существования родоначальных расплавов низкокалиевых островодужных серий, что позволило предложить модель их образования путём плавления амфиболитов в нижних частях островодужной коры.

Обобщены данные по петрографии и минеральному составу полей моногенных вулканитов Камчатки, показаны их систематические отличия от других типов вулканитов и предложена модель их происхождения путём плавления амфиболовых пироксенитов, которые в свою очередь являются реститами от выплавления магм вулканического фронта.

Разработана *обобщенная* модель эволюции вулканизма островодужных систем, объясняющая наличие областей развития островодужного вулканизма не приуроченных к современным зонам субдукции.

Впервые на основе петрологических данных и гидродинамического моделирования построена количественная модель конкретного извержения (вулкан Шивелуч, 2001-2004 гг). Разработанные методы были применены к андезитовым вулканам островных дуг, для которых характерна смена режима извержения от медленного роста лавового купола к катастрофическим взрывам.

Впервые проведено термодинамическое моделирование кристаллизации магм в системе с градиентом температур в применении к процессам гибридизации в островодужных системах и разработана модель механизма гибридизации кислых и основных магм, показана его широкая применимость к островодужным объектам.

Практическое значение.

Результаты, полученные в данной работе, служат цели построения общих геодинамических моделей островодужного магматизма, могут быть использованы при интерпретации геохимических данных с целью реконструкции палео-островодужных систем, прогнозирования характера извержений и общей вулканоопасности в районах активного вулканизма.

Основные защищаемые положения.

1. На основе детального изучения низкокалиевых островодужных магм андезибазальтового состава, приуроченных к активному вулканическому фронту развитой островодужной системы, доказано, что они формируются при частичном плавлении амфиболитов в нижней части островодужной коры при 8-10 кбар, 1130-1160°C и степенях плавления более 25%. Эти магмы являются родоначальными для типичных вулканических серий активного фронта развитых островных дуг.
2. На основе детального изучения вулканитов умереннокалиевой высокотитанистой серии, характерных для тыловых частей островных дуг, доказано, что они формируются путём частичного плавления пироксенитов при 8-16 кбар, 1230-1280°C и степени плавления 5-20%. Показано, что сами пироксениты являются реститами от выплавления магм активного вулканического фронта.
3. Множественность источников островодужных магм основного состава определяется последовательным вовлечением по мере эволюции островодужной системы нижних частей островодужной коры в зоны магмогенерации. Специфика вулканических серий развитых островных дуг

определяется условиями плавления островодужной коры и процессами гибридизации магм из различных источников в долгоживущих приповерхностных магматических очагах.

4. Вулканические серии андезитовых вулканов Камчатки (Шивелуч, Кизимен, Безымянный) имеют гибридный генезис и образуются в результате взаимодействия глубинных базальтовых расплавов с риолитовыми магмами в приповерхностных очагах. Гибридизация магм сопровождается активной кристаллизацией минералов из более горячего расплава и растворением минералов в более холодном, и, приводит к локальному разогреву очага. Изучение минеральных реакций показало, что инъекции базальтов могут вызывать извержения в течение первых недель после поступления базальтовой магмы в приповерхностный очаг.

Структура работы.

Работа состоит из 10 глав, общим объемом 250 страниц, с 120 иллюстрациями и 23 таблицами. Список литературы содержит 419 наименований. Во введении дана общая характеристика работы, ее актуальность и научная новизна. Первый раздел, состоящий из 3 глав, посвящен описанию основных методов и подходов, использованных при выполнении данной работы, общей характеристике островодужного вулканизма и рассмотрению эволюции островодужной системы на примере Камчатки. Второй раздел, состоящий также из трех глав, посвящен петрологическому описанию конкретных объектов выделенных серий. В главах 8 и 9 рассматриваются вопросы гибридизации магм в близповерхностных очагах на примере нескольких долгоживущих центров андезитового вулканизма и результаты численного моделирования в открытых вулканических системах.

Апробация работы.

Результаты исследования изложены в 91 публикации, в том числе в 1 монографии и 18 статьях в периодических журналах. Они докладывались на международных и всероссийских конференциях (72 доклада) в 1997-2008 годах.

Работа выполнялась в рамках программы Президента РФ «Ведущие научные школы России» (грант 5338.2006.5, рук. Л.Л.Перчук), гранта Royal Society и проектов РФФИ-05-01-02901-ЯФ_а, РФФИ-06-05-64873, 07-05-00959. Часть результатов, использованных в работе, получены в рамках гранта РФФИ № 03-05-64629 и гранта КОМEX-2 Министерства Науки и Образования ФРГ (ВМВФ).

Благодарности.

Автор выражает признательность М.В. Портнягину, Л.Л.Перчуку, О.Э.Мельнику, Л.В.Данюшевскому, О.В.Дирксену за многолетнее плодотворное сотрудничество и моральную поддержку.

Автор признателен Л. Аникину, М.В. Портнягину, В.А.Ермакову, С. Чиркову, В.Л. Сывороткину, И. Н. Биндеману, А.О. Волынец, М.М.Певзнер, А.Б.Осипенко, М.Ю. Пузанкову, О.В. Дирксену, Л.И.Базановой, Т.Г.Чуриковой, Г.Вернеру, Дж.Бланди за предоставленные для исследования образцы.

Автор благодарен Е.В.Гусевой, Н.Н.Кононковой, Н.Н.Коротаевой, А.Кронцу и М.Тёнеру за помощь в проведении микрозондовых исследований; С.Г.Симакину и Е.В.Потапову за проведение ионно-зондовых анализов; Г.Вёрнеру за предоставленную возможность работы в Геохимическом институте Гёттингена; Л.В.Данюшевскому за возможность использования и помощь в освоении программ «Петролог-2.0» и «Fe-loss».

Л.Л.Перчуку, А.А.Маракушеву, И.П.Солововой, В.Б.Наумову, И.Н.Биндеману, И.В.Мелекесцеву, А.А.Арискину, В.А.Ермакову, А.А.Бармину, С.Спарксу, М.Хампфрей, В.В.Пономаревой автор признателен за конструктивные обсуждения отдельных аспектов данной работы.

Особую благодарность выражаю студентам и аспирантам кафедры петрологии – Н.Л.Миронову, С.А.Тетроевой, С.В.Трусову, К.А.Бычкову, Т.А.Шишкиной, В.Д.Щербакову, А.Е.Цай, С.П.Крашенинникову, И.С.Фомину, которые принимали участие в изучении полевого материала и его обработке в лабораторных условиях:

Методическая основа работы.

При исследовании природных объектов был использован комплексный подход изучения природного материала. Детали методики подробно рассмотрены в главе диссертации «Методы исследования». Были привлечены классические геологические, геохимические, петрографические и петрологические методы описания вулканических серий, наряду с новыми методами изучения расплавных включений, незавершенных минеральных реакций, термодинамического и гидродинамического моделирования. Для интерпретации результатов привлекались данные тефрохронологии, сейсмоки и сейсмологии, мониторинга вулканической активности.

Для корректной интерпретации результатов исследования расплавных включений были проделаны серии методических экспериментов, которые позволили систематизировать эффекты, искажающие составы расплавных

включений. Специально проведенные эксперименты по изучению граничного слоя [Плечов, Трусов, 2000], показывают, что влияние граничного слоя на состав включений незначительно. Частичная декрепитация включений, миграция включений по зерну, диффузионный обмен компонентами с минералом-хозяином, частичная или полная диссипация летучих, захват включений на фронте резорбции и другие эффекты способны гораздо больше влиять на измеряемые величины. Автором данной работы был опубликован ряд статей [Pletchov, Kotel'nikov, 1997; Плечов, Трусов, 2000; Граменицкий и др., 2000; Портнягин и др., 2000, 2005b; Плечов и др., 1999, 2000, 2003], посвященных методическим аспектам изучения расплавных включений.

Искажения состава расплава во время захвата включения минералом-хозяином происходят вследствие неучтенного влияния следующих эффектов:

- Граничный слой (кристаллизационный дворик) [Плечов, Трусов, 2000]
- Гетерогенный захват [Плечов и др., 1999]
- Захват включений на фронте резорбции [Плечов и др., 2000]
- Дорастание скелетных и футляровидных кристаллов [Pletchov, Kotel'nikov, 1997]

После захвата включения, кроме кристаллизации минерала-хозяина на стенки включения и образования дочерних кристаллов внутри включения [Roedder, 1984], могут происходить следующие эффекты, приводящее к изменению его состава:

- Частичная декрепитация. [Портнягин и др., 2000; 2005b]
- Миграция включений по минералу-хозяину.
- Изменение формы включений после захвата. [Clocchiatti, 1975]
- Диффузионный обмен с минералом-хозяином. [Danyushevsky, 2000; Gaetany, Watson, 2002]
- Диффузионный обмен с окружающим расплавом через минерал-хозяин [Qin et al., 1992; Spandler et al., 2007; Portnyagin et al., 2008]
- Вторичные изменения и девитрификация.

Из приведенного списка эффектов, влиянию миграции включений и вторичным изменениям, в том числе девитрификации стекла во включениях не уделялось достаточного внимания в литературе. Однако, такие включения легко распознаются при петрографическом исследовании и не рассматриваются в данной работе как источник информации о магматических расплавах.

Данные по мощности реакционных кайм, образовавшихся в результате реакции минералов с окружающим расплавом, используются в данной работе для определения интервалов времени нахождения кристаллов в

неравновесном с ними расплаве. Детальному рассмотрению результатов, основанных на изучении реакционных кайм, посвящены работы [Dirksen et al., 2006; Плечов и др., 2008] и глава «Динамические системы смешения» данной диссертации. Мощности реакционных кайм измерялись на сечениях зерен в шлифах, ориентировка которых определялась при помощи универсального теодолитного столика Федорова. Для каждого зерна были определены сферические координаты как минимум 2 выходов осей индикатрисы.

Совместно с Л.В.Данюшевским для задач данной работы был разработан новый программный комплекс Petrolog-III, работающий в среде MS Windows [Плечов, Данюшевский, 2006]. Он предназначен для моделирования прямой и обратной кристаллизации в ультраосновных и основных магматических системах. В программный комплекс включены возможности моделирования поведения расплавных включений в оливине: оценка эффекта потери железа и моделирование диффузионных профилей в оливинах вокруг расплавных включений. В программе Petrolog-III реализована пошаговая схема моделирования кристаллизации. На каждом единичном шаге кристаллизации из расплава вычитается тот минерал, у которого псевдоликвидусная температура максимальна. Такой алгоритм моделирования кристаллизации позволяет использовать независимо друг от друга модели описывающие равновесие каждого минерала с расплавом. На данный момент Petrolog-III включает в себя 46 опубликованных различными авторами моделей минерал-расплав для 8 минералов. Объектно-ориентированная структура программы позволяет добавлять неограниченное количество моделей для любого количества минералов. Для возможности сравнения и совместного использования моделей в водосодержащих системах при давлениях, отличных от атмосферного, в программе Petrolog-III предусмотрена возможность введения поправок к температурам равновесия, как функции от давления и/или содержания воды в системе. Также, в программе заложена возможность использования наборов коэффициентов распределения для 38 рассеянных элементов, наряду с использованием более сложных моделей распределения для отдельных элементов. По сравнению с другими программами моделирования, Petrolog-III имеет принципиально новые возможности: 1) возможность моделирования поведения рассеянных элементов на основе сложных моделей распределения (например, Beattie, 1993; Kinzler et al., 1990); 2) возможность моделирования полибарической кристаллизации с заданием серии промежуточных очагов 3) моделирование кристаллизации в водонасыщенных условиях с количественной оценкой дегазации; 4) моделирование равновесной

кристаллизации с учетом прохождения перитектических реакций; 5) возможность моделирования при различной степени фракционирования для каждого минерала в отдельности. Таким образом, программа Petrolog-III оптимально подходит для моделирования островодужных вулканических систем, характеризующихся высокими содержаниями воды в магмах и обилием промежуточных очагов.

Родоначальные расплавы низкокалиевых серий развитых островных дуг (обоснование первого защищаемого положения).

Низкокалиевые вулканические серии являются доминирующими в пределах вулканических фронтов развитых островных дуг. Характерны непрерывные ряды от андезибазальтов до риолитов с преобладанием пород кислого и среднего состава. Для наиболее основных членов серий характерны низкие содержания MgO (4-7 масс. %), K₂O (< 0.6 масс. %), высокие содержания Al₂O₃ и CaO. Эти серии отличаются от низкокалиевых высокомагнезиальных вулканических серий примитивных островных дуг низкой магнезиальностью, меньшими содержаниями ВЗЭ и легких РЗЭ и обилием кислых вулканитов в составе серии.

Для оценки составов родоначальных расплавов низкокалиевых серий развитых островных дуг были применены методы петрологического моделирования на основе данных по расплавленным включениям в оливин-плагиоклазовых кумулятах (алливалитах) низкокалиевых серий, в сочетании с минералогией и петрографией пород. Кумуляты, образовавшиеся на ранней стадии фракционирования очагов, кристаллизовались из расплавов, близких к родоначальным. Кумулятивные горизонты разрушаются поздними порциями магм и выносятся на поверхность в виде блоков крупными кальдерообразующими извержениями вулканов низкокалиевых серий [Фролова и др., 2001; Плечов и др., 2008b].

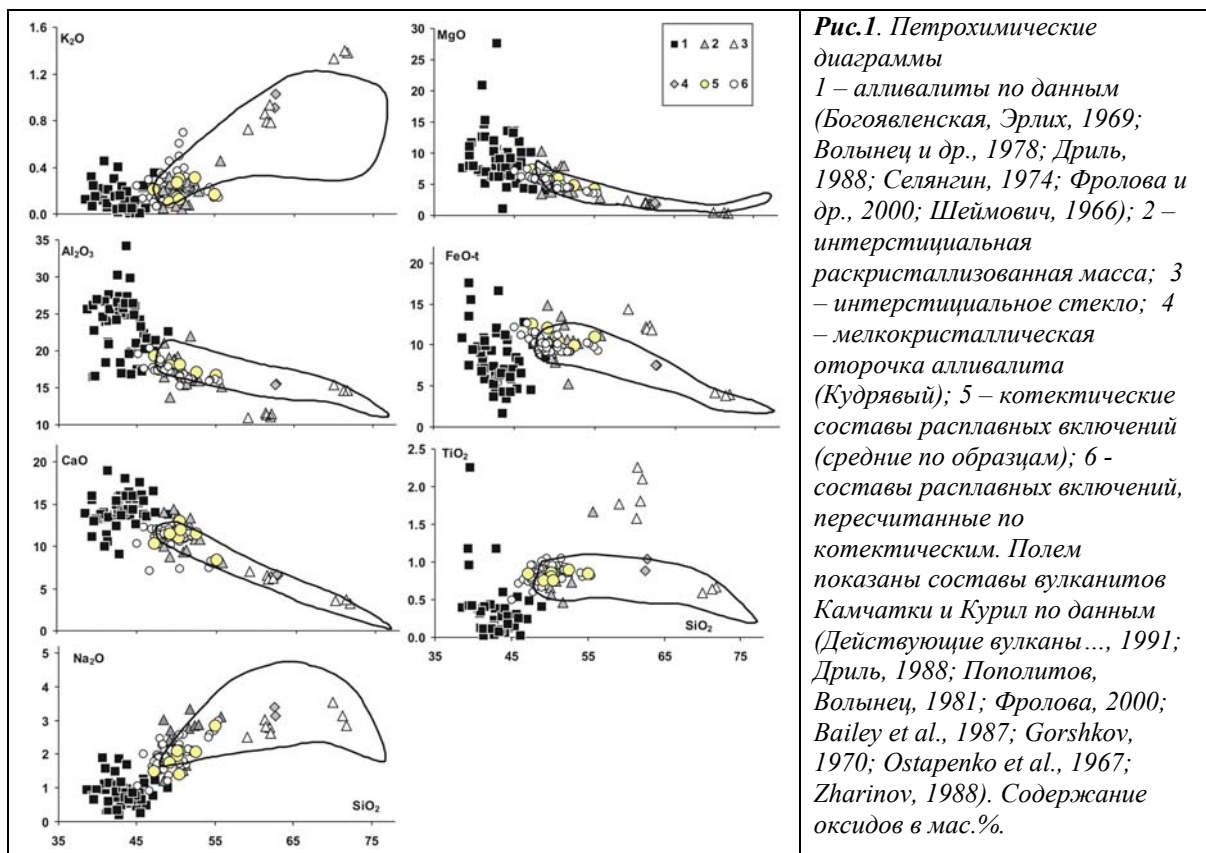
В данной работе представлены данные по изучению расплавленных включений в оливинах из 10 образцов алливалитов различных морфологических типов с вулканов Ксудач, Ильинский, Заварицкого, Кудрявый и Головнина. Приведены новые данные по составам пороодообразующих минералов, гомогенизированных расплавленных включений, составам минеральных дочерних фаз в раскристаллизованных расплавленных включениях и интерстициальных стекол алливалитов. Эти данные позволили рассмотреть существующие гипотезы образования алливалитов, подтвердить кумулятивный механизм и оценить условия их формирования.

Для оценки родоначальных расплавов был предложен количественный метод определения составов исходных расплавов оливин-плагиоклазовых кумулятивных пород на основе данных по составу частично гомогенизированных расплавных включений и содержанию в них H_2O . На основе данного метода восстановлены исходные составы расплавов, родоначальных для алливалитов. Кристаллизация происходила при температурах 970-1080°C в относительно окисленной обстановке ($\Delta NNO=+1$), в условиях близких к насыщению водным флюидом при давлении ~1 кбар. Максимальные температуры (1050-1085°C) установлены для расплавов алливалитов вулкана Заварицкого ($MgO \sim 7.3$ мас.%), минимальные для алливалитов с относительно железистым оливином $Fo < 76$ мол.% вулканов Ксудач (970-985°C) и Головнина ($MgO \sim 4-5$ мас.%, 990-1020°C).

Масс-балансовые расчеты показали, что степень фракционирования родоначальных расплавов при образовании кумулятивных горизонтов алливалитового состава варьирует от 22 до 46%. Вероятно, интервал кристаллизации, зафиксированный в составе алливалитов и расплавных включений, соответствует начальному этапу эволюции родоначальных низко-калиевых магм, приводящему к образованию широко-дифференцированных серий низко-калиевых андезибазальтов, андезитов и дацитов Камчатки и Курильских островов.

С помощью программы Petrolog III [Плечов, Данюшевский, 2006] была промоделирована фракционная кристаллизация оливина и плагиоклаза из расплавов, соответствующих расплавным включениям в наиболее магнезиальных оливинах для каждого из изученных вулканов. Для оливина была выбрана модель [Danyushevsky, 2001], для плагиоклаза [Pletchov, Gerya, 1998]. В качестве критерия остановки расчетов использовался состав наиболее железистого оливина, зафиксированный в алливалитах для каждого из вулканов. При моделировании серии вулкана Ксудач было получено 35% кумулята, содержащего 84.4 мас. % плагиоклаза ($An_{91.2}$) и 15.6 мас. % оливина ($Fo_{78.6}$). Для вулкана Головнина использовался диапазон состава оливинов Fo_{79-74} , поскольку алливалиты с более железистыми оливинами, описанные для этого вулкана, содержат значительное количество клинопироксена. Было получено 24% кумулята, состоящего из 81.7 % плагиоклаза ($An_{94.7}$) и 18.3 % оливина ($Fo_{75.7}$). Значительные колебания пропорций минералов в изученных алливалитах и наблюдаемые полосчатые текстуры в некоторых образцах объясняются накоплением ритмично-полосчатых оливин-анортитовых кумулятов.

Реконструированные родоначальные расплавы низкокальциевых островодужных серий Камчатки и Курил имеют низкое содержание K_2O , содержания редкоземельных элементов ниже уровня MORB, нормализованные к MORB La/Sm и La/Yb отношения меньше 1 и высокое Ba/La отношение, что характеризует их как типичные низкокальциевые островодужные толеиты. Средние составы исходных расплавов значительно варьируют для изученных образцов. Для всех расплавов наблюдается положительная корреляция между содержаниями MgO (4.2–7.3 мас. %) и Al_2O_3 (16.8–19.3 мас. %) и отрицательная корреляция между MgO , SiO_2 (47.2–55 мас.%) Na_2O (1.4–2.8 мас.%), FeO (9.5–12.5 мас.%) и CaO (8.4–13.1 мас.%) варьируют в зависимости от MgO не систематически. Для отдельных вулканов FeO в расплавах остается на приблизительно постоянном уровне, а CaO уменьшается с уменьшением MgO . Содержания TiO_2 и K_2O для отдельных вулканических центров увеличиваются при уменьшении MgO . Наиболее обеднены этими элементами расплавы вулкана Головнина. Низкое содержание K_2O характерно также для Ильинского вулкана.



Из всего проанализированного набора рассеянных элементов в расплавах низкокальциевых серий Камчатки и Курил только Ba , Pb и Sr выше, чем

содержания этих элементов в N-MORB. Эти расплавы крайне обеднены высоkozарядными элементами даже по сравнению с MORB, содержания Nb в 3.9-27 раза ниже, чем в N-MORB, содержания Zr в 3.9-7.1 раза ниже. При крайней обедненности родоначальных расплавов редкими элементами, магнезиальность ($MgO/MgO+FeO$ мол.%) этих расплавов варьирует в пределах 0.34-0.64, наиболее магнезиальные расплавы (до 8.85 MgO мас.%) отмечены для вулкана Головнина. Составы исходных расплавов алливалитов хорошо соответствуют составам базальтов и андезибазальтов низко-K серий Камчатки и Курильских островов, что указывает на их несомненное генетическое родство и происхождение в результате эволюции общих родоначальных магм, состав которых несколько варьировал для разных вулканов. Составы исходных расплавов алливалитов эволюционируют в сторону обогащения SiO_2 при уменьшении MgO и могут являться родоначальными для андезитов низкокалиевых серий вулканического фронта (рис.1).

В диссертационной работе приводится критический обзор существующих на данный момент гипотез образования низкокалиевых островодужных магм. Доминирующая в литературе гипотеза образования этих магм за счет высоких степеней плавления мантии под воздействием водного флюида [Tatsumi, 1995] не может объяснить низкую магнезиальность родоначальных расплавов наряду с обедненными по отношению к базальтам COX и к базальтам примитивных островных дуг спектрами рассеянных элементов в области ВЗЭ и легких РЗЭ. Для обоснования первого защищаемого положения рассмотрим в качестве источника нижнюю часть островодужной коры, сложенную амфиболитами.

Частичное плавление амфиболитов может привести к образованию андезитовых расплавов [Wolf, Wyllie, 1994; Rapp, Watson, 1995]. Springer и Seck [1997] оценили соотношение фаз при плавлении базальтового источника (роговая обманка, клино- и ортопироксены, плагиоклаз ± гранат) и по коэффициентам распределения рассчитали спектр рассеянных элементов. Спектр сильно зависит от фазы, остающейся в рестите. Плавление с

амфиболом в рестите (<10 кбар) дает расплавы с ровным спектром, а с гранатом (>10 кбар) - обеднение HREE.

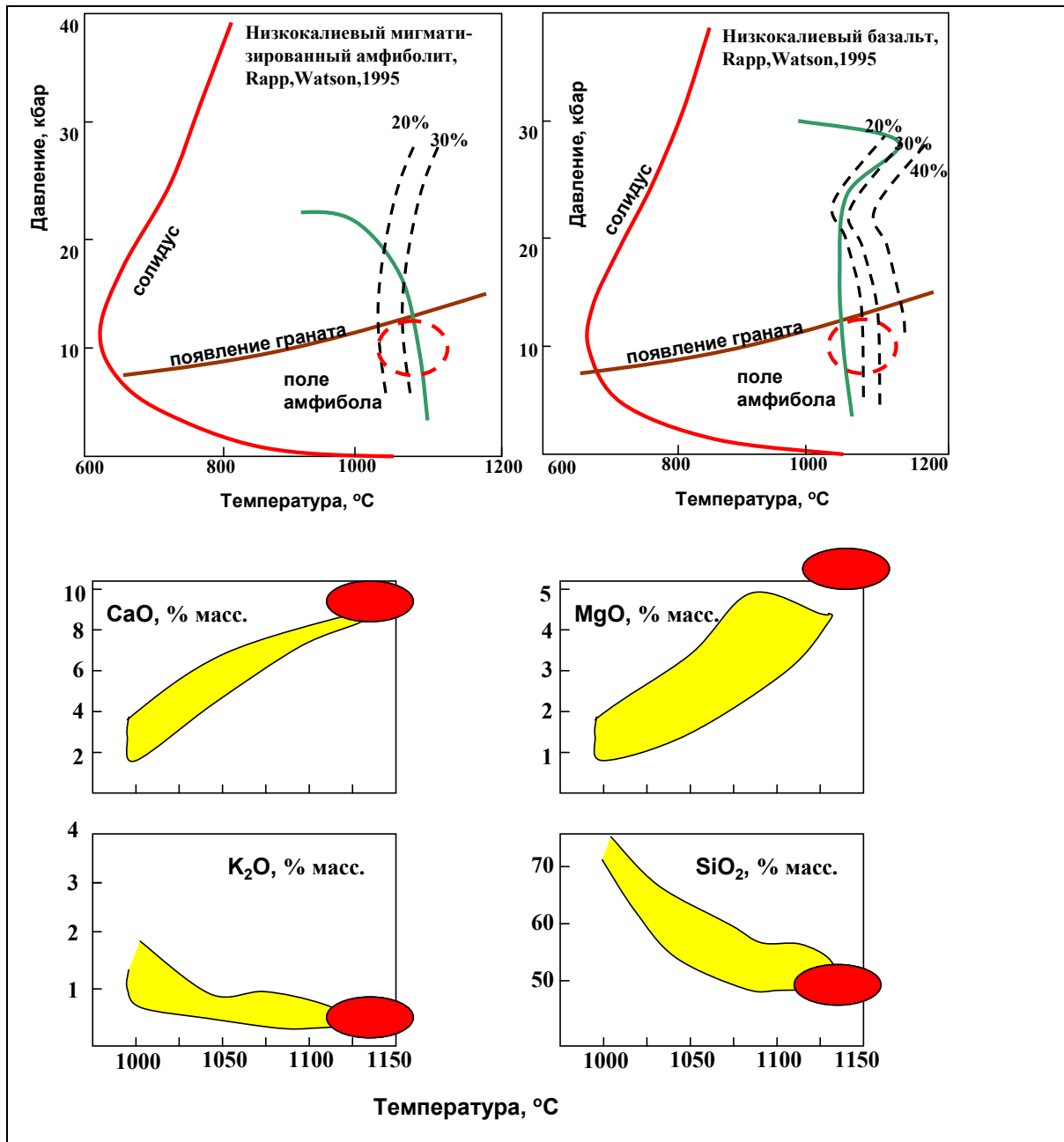


Рис. 2. Соотношение экспериментальных данных по плавлению метабазитов [Rapp, Watson, 1995] в водонасыщенных условиях с данными изучения расплавных включений в оливинах из алливалитов Курило-Камчатской островной дуги.. Черной пунктирной линией показаны степени плавления субстрата. Красным пунктиром обведено поле предполагаемых условий плавления амфиболитов в нижних частях островодужной коры. На нижних графиках желтым полем показаны составы расплавов при плавлении амфиболита в водонасыщенных условиях при 8-16 кбар. Красное поле – составы расплавных включений в оливине, расчетные температуры скорректированы для давления 8-16 кбар.

Таким образом, низкокалийевые толеиты могут получаться в результате частичного плавления метагаббро с амфиболом в рестите. Для обедненного LREE спектра, который наблюдается в низкокалийевых базальтах, метагаббро должны были быть также обеднены LREE.

Это предположение подтверждается экспериментами [Johannes, Holtz, 1996], которые показали, что при плавлении амфиболитов при различном давлении могут получаться расплавы с различным содержанием K₂O. Расплавы, сравнимые с природными, образуются при давлении 8 - 10 кбар.

[Kimura et al., 2002] оценили содержания редких элементов в расплаве при плавлении амфиболитового источника, взяв роговую обманку, клинопироксен и плагиоклаз в качестве главных минералов, контролирующих содержания редких элементов в расплаве. Было показано, что при степенях плавления 25-40% образуются низкокалийевые андезибазальты с характерным набором геохимических признаков (низкие содержания титана, PЗЭ и ВЗЭ, высокие содержания алюминия, Ba и Sr). Эффект обеднения продуцируемых расплавов рассеянными элементами достигается за счет концентрации большинства элементов в амфиболе, остающимся в рестите до степеней плавления около 53% [Kimura et al., 2002]. При больших степенях плавления, амфибол в рестите не сохраняется и геохимия образующихся расплавов будет близка к геохимии базальтов, образующихся за счет частичного плавления мантии, вызванного флюидом.

Таким образом, показана возможность образования родоначальных расплавов низкокалийевых островодужных серий за счет плавления амфиболитов нижней части островодужной коры (P~0.8 GPa, степени плавления 25-40%). Низкие содержания рассеянных элементов, в особенности HFSE и LREE, по отношению к низкокалийевым базальтам примитивных островных дуг объясняются их концентрацией в амфиболах, сохраняющихся в рестите.

Умереннокалийевые базальты зон ареального вулканизма Камчатки (обоснование второго защищаемого положения).

С ареальными вулканическими зонами островных дуг, в каждой из которых насчитываются десятки и сотни моногенных конусов, связаны

проявления особого типа умеренно-калиевых высокотитанистых базальтов. Ареальный вулканизм имеет широкое распространение на территории п-ова

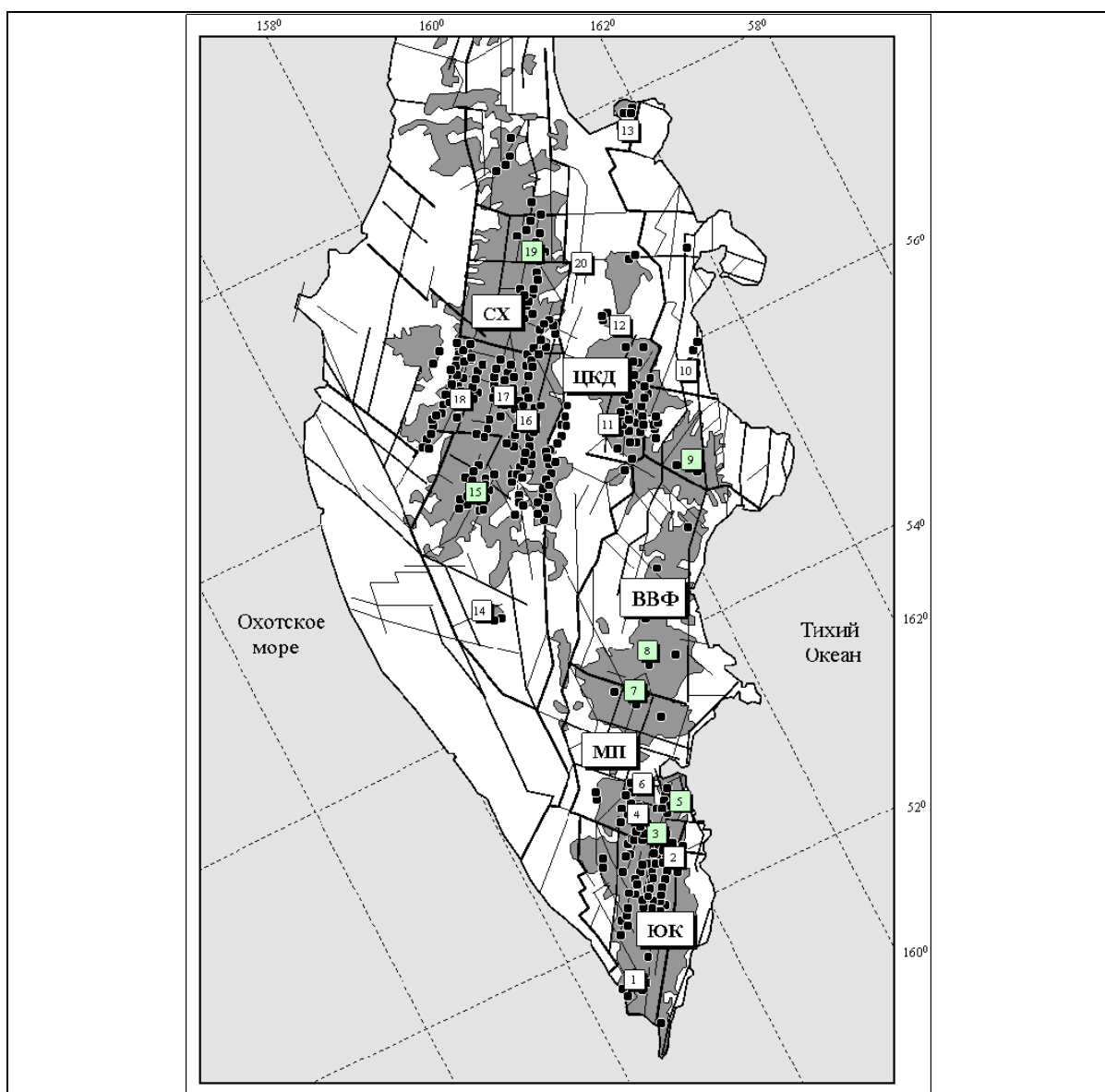


Рис. 3. Схема позднеплейстоцен-голоценовых полей моногенных вулканитов Камчатки. (Составлена А.Б.Перепеловым, с изменениями автора). Обозначения:

1 – площадь, занятая плиоцен-четвертичными вулканитами. **2** – места проявления верхнеплейстоцен-голоценового моногенного вулканизма. **3** – региональные разломы различных рангов (установленные и предполагаемые); **4** – ареальные поля моногенного вулканизма. **5** – Современные структурные зоны Камчатки ("ЮК" – Южная Камчатка, "ВВФ" – Восточный вулканический фронт, "ЦКД" – Центрально-камчатская депрессия, "СХ" – Срединный хребет, "МП" – Малкинско-Петропавловская разломная зона).

Южная Камчатка: 1-поле р.Озерная, вулканы Явинский и Ухо; 2 – поле Асача-Горелый; 3-Толмачев Дол; 4 – поле Шиковой тундры; 5 – поле вулкана Вилючинский; 6 – поле р.Табуретка.

Восточная Камчатка: 7-8 р-н влк. Бакенинг, падь Фарафонова, р.Костакан; 9- Кизимено-Гамченская зона; 10 – поле хр.Кумроч.

Центрально-камчатская депрессия: 11-Толбачинский дол; 12 –Харчинско-Заречная зона; 13 – зона влк. Начикинский

Срединный хребет: 14 –плато Голодыяк; 15 – Ичинская зона ареального вулканизма; 16 – Козыревский хребет; 17 –Анаунская зона и влк.Уксичан; 18 – Дол Геологов; 19 – Седанкинский Дол; 20 – зона рр. Еловка-Озерная;

Камчатка и играет важную роль в формировании магматических систем и разнообразии изверженных пород в течение плейстоцена – голоцена.

На схематической карте (рис. 3) представлены районы исследований. Масштаб и интенсивность базальтового моногенного вулканизма в Срединном хребте за последние 40-50 тыс. лет значительно превосходит другие структуры Камчатки [Певзнер 2004, 2006; Базанова, Певзнер, 2001; Dirksen et al., 2004]. Площадь базальтовых излияний в верхнеплейстоцен-голоценовое время составила свыше 8500-9000 км², а объем изверженного материала оценивается в 2000-2150 км³ [Новейший и современный вулканизм..., 2005]. По данным [Огородов и др., 1972] в Срединном хребте выделено около 1000 моногенных вулканических образований – шлаковых и лавовых конусов.

В пределах района Южной Камчатки выделяются масштабные проявления ареального вулканизма: Толмачев Дол, Северо-Асачинское, Право-Ходуткинское, Саванское. Кроме отдельных полей выделяется ряд моногенных образований, приуроченных к постройкам центрального типа (шлаковые конуса вулканов Вилючинский, Горелый и др.). Площадь покрытая ареальными вулканитами оценивается в 1500 км², а объем около 200 км³ [Шеймович, 1982].

Ареальный вулканизм восточного вулканического фронта представлен менее масштабными проявлениями. Для района рек Лево́й и Средней Авачи показано [Dirksen, 1998], что вулканическая активность имела место в позднем плейстоцене – голоцене, а возраст наиболее молодых конусов лежит в диапазоне 600 – 1200 лет. Среди моногенных вулканических образований приуроченных к Авачинскому вулкану, выделяются высоко-магнезиальные базальты голоценовых шлаковых конусов Добрыня, Страж и др., которые по петрохимическим и геохимическим характеристикам отличаются от главной вулканической серии влк.Авача, особенно по содержанию некогерентных компонентов и, поэтому могут быть отнесены к ареальному типу вулканизма. Конус Лагерный и извержение 1996 г. (п-ов Новогодний) в районе вулкана Карымский имеют общие петрохимические и геохимические характеристики с андезитами вершинных излияний вулкана [Izbekov et al., 2004], но представляют собой гораздо менее дифференцированные разности.

В Центральной Камчатской Депрессии ареальный вулканизм проявлен в пределах Ключевской группы вулканов, где выделяется линейная зона длиной около 70 км (площадь 875 км²), представленная более чем 200 конусами [Ермаков и др., 1971]. Толбачинская зона ареального вулканизма сопряжена к северу с зоной шлаковых конусов Плоских сопок,

протяженностью 35 км и шириной 6-8 км. К северу от этой зоны, между вулканами Харчинский и Шивелуч выделяется поле ареальных высокомагнезиальных базальтов [Волынец и др., 1998, 1999].

Были детально изучены петрографические и минералогические особенности представительных образцов голоценовых базальтов из полей ареальных вулканитов Срединного Хребта Камчатки, р-на влк.Бакенинг и Толмачева Дола. На основе изучения расплавных включений в наиболее магнезиальных оливинах-вкрапленниках были оценены составы и условия кристаллизации родоначальных расплавов этого типа. Содержания воды и рассеянных элементов были измерены в экспериментально закаленных расплавных включениях с помощью ионной масс-спектрометрии. Содержания H_2O в магмах голоценовых базальтов Срединного Хребта оценены ~0.3 мас.%, давление кристаллизации ~1.5 кбар и температуре ~1210°C. Летучесть кислорода, оцененная при этой температуре по Ol-Sp геобарометру [Ballhaus et al., 1991], соответствует буферному равновесию никель-бунзениит [Плечов и др., 2003].

Ключевые черты проявлений вулканизма этого типа на Камчатке можно сформулировать следующим образом:

- 1) Ареальные вулканиты Седанкинского Дола, Ичинской зоны ареального вулканизма, Толмачева Дола, р-на влк.Бакенинг сходны друг с другом по петрографическим признакам и химическим особенностям вне зависимости от положения относительно современных геодинамических структур.
- 2) В пределах Срединного Хребта ареальные вулканиты проявлены гораздо более широко, чем в пределах ВВФ. На Южной Камчатке ареальные вулканиты также более распространены, чем в ВВФ.
- 3) Все ареальные вулканиты обогащены калием и титаном, а также ниобием и легкими REE по сравнению с «типично островодужными» сериями.
- 4) В ареальных вулканитах Срединного Хребта обильны ксенолиты пироксенитов, но не обнаружено ни одного ксенолита перидотитов.
- 5) Большинство ареальных вулканитов Срединного Хребта слабодифференцированы, обычны скелетные формы кристаллизации ликвидусных фаз, однако в них не встречено высокомагнезиальных

оливинов, которые могли бы отражать равновесие с мантийным веществом.

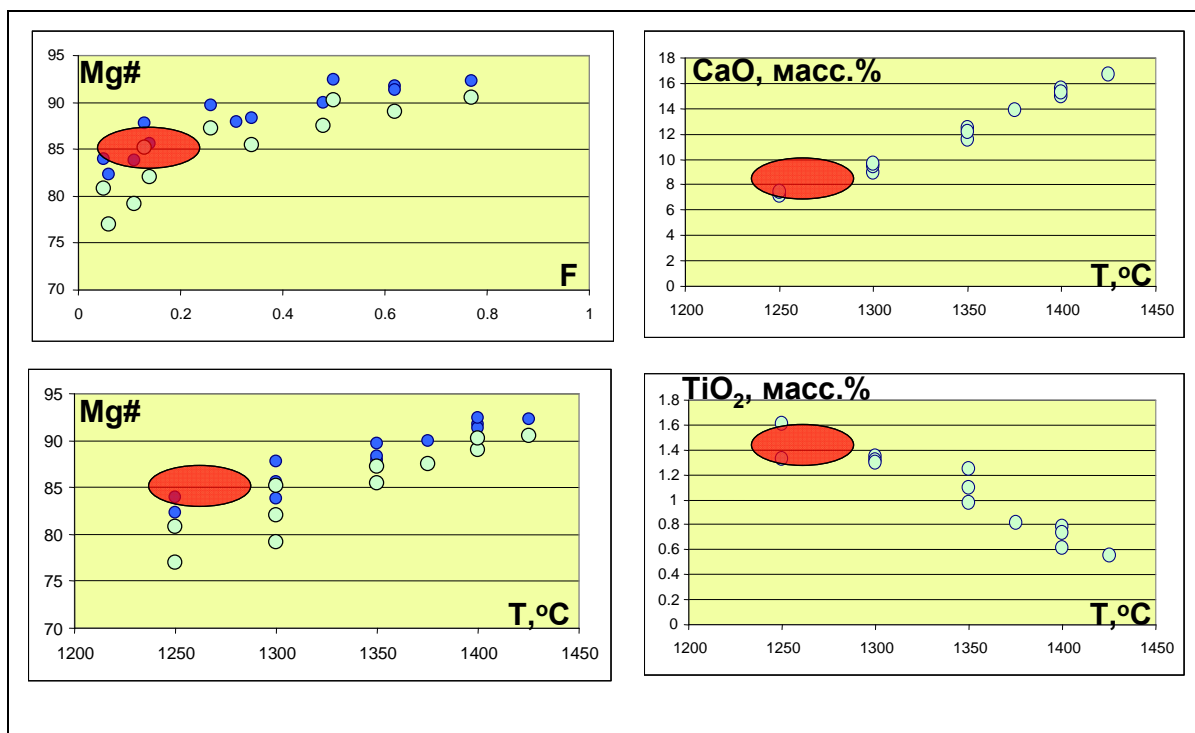


Рис.4 Сравнение составов минералов и расплавов ареальных вулканитов голоценового возраста Срединного Хребта Камчатки с экспериментальными данными по плавлению пироксенитов [Kosigo, Hirshmann, 2001]. На графиках слева показано изменение магнезиальности (Mg#) оливина (зеленые кружки) и клинопироксена (синие кружки) в равновесии с расплавом в зависимости от степени плавления F (верхний график) и температуры (нижний график). На графиках справа показано изменение состава расплава в зависимости от температуры (и степени плавления). Поле, закрашенное красным на каждой диаграмме, показывает составы минералов и расплавов в образцах ареальных базальтов Срединного Хребта.

Экспериментально показано, что пироксениты могут плавиться при температурах около 1250°C даже в сухих условиях при давлении, соответствующем низам островодужной коры [Kosigo, Hirshmann, 2001]. Пересчитанные для давлений 8-16 кбар температуры родоначальных магм ареальных базальтов Срединного Хребта Камчатки лежат в диапазоне 1240-1280°C.

На рис.4 хорошо видно, что расплавы, образующиеся при небольших степенях плавления (5-20%) пироксенитов имеют температуры, отвечающие температурам, полученным для природных образцов. При этих степенях плавления полученные экспериментально выплавки хорошо соответствуют природным расплавам по всем петрогенным компонентам. Кроме этого, составы наиболее ранних вкрапленников оливинов и пироксенов ареальных

базальтов согласуются с теми же степенями плавления пироксенитов по данным [Kosigo, Hirshmann, 2001].

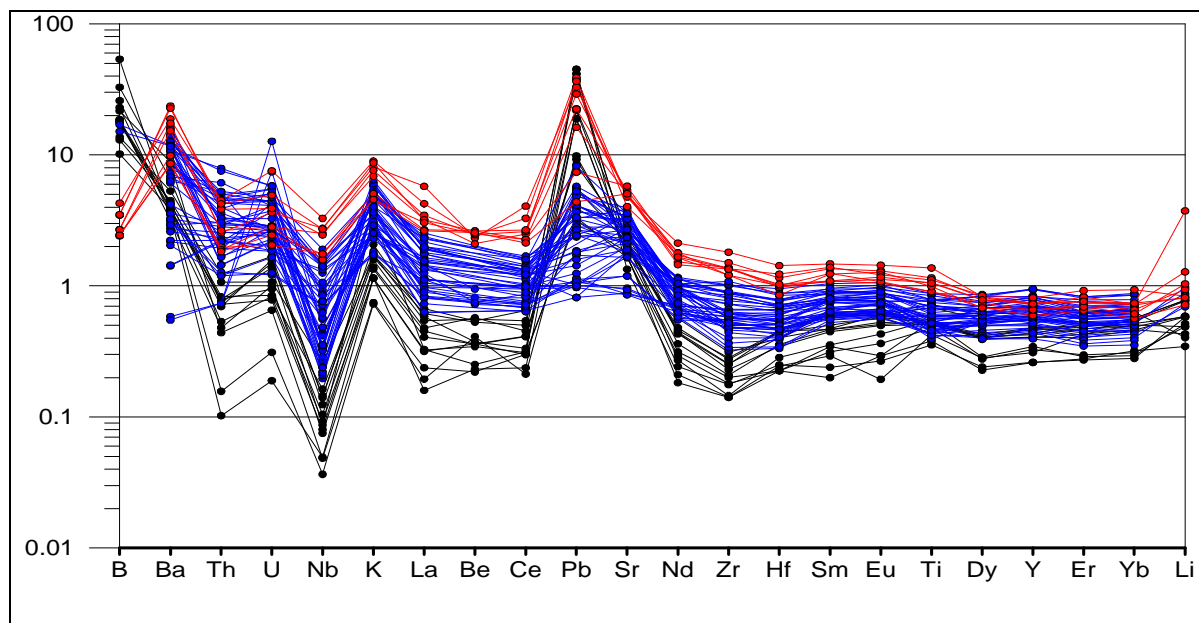


Рис.5 Распределение элементов в базальтовых расплавах островодужных серий. Синие линии – заклочные стекла высокомагнезиальных базальтов примитивных островных дуг (Марианская островная дуга), черные линии – составы расплавов (по расплавленным включениям в оливине) низкокалийевых базальтов развитых островных дуг (Южная Камчатка и Курилы), красные линии – составы расплавов умеренно-калийевых высоко-титанистых базальтов зрелых островных дуг (Камчатка).

На рис.5 показаны характерные спектры распределений редких и рассеянных элементов в высокомагнезиальных базальтах примитивных островных дуг, низкокалийевых базальтах развитых островных дуг и в умереннокалийевых высоко-титанистых базальтах ареальных полей вулканизма. Хорошо видно, что низкокалийевые серии развитых островных дуг обеднены по многим компонентам по сравнению с базальтами примитивных островных дуг. При этом, умереннокалийевые высоко-титанистые базальты областей ареального вулканизма обогащены этими же компонентами (кроме B, Pb, Cl, H₂O). Такие соотношения можно объяснить комплиментарностью субстрата плавления низкокалийевых и умереннокалийевых базальтов относительно базальтов примитивных островных дуг.

Автором предполагается, что возможным объяснением всех вышеизложенных особенностей состава ареальных вулканитов является вовлечение в область плавления немантийного источника. Выше было показано, что низкокалийевые базальты развитых островных дуг могут образовываться за счет плавления амфиболитов, слагающих основание

островодужной коры и представляющих собой метаморфизованные вулканиты стадии примитивной островной дуги. При этом, происходит образование низкокалиевых магм, характеризующихся также низкими содержаниями титана, ниобия (ниже уровня MORB) и легких REE. Если в качестве субстрата плавления рассматривать примитивную островодужную кору, метаморфизованную в амфиболитовой фации метаморфизма, то в результате в нижней части островодужной коры должны накапливаться породы комплиментарные по химизму образующимся расплавам. Это могут быть амфиболовые пироксениты, в которых амфибол (и, в меньшей степени, пироксен) концентрируют вышеназванные элементы. Такие пироксениты описаны в низах островодужных разрезов большинства палеодуг [Kelemen et al., 2003] и фиксируются в виде ксенолитов в современных островодужных лавах. При развитии островной дуги эти породы могут вовлекаться в область магмогенерации за счет деляминации блоков коры в мантию [Kelemen et al., 2003] или за счет эрозии нижних частей островодужной коры восходящими мантийными потоками.

Таким образом, магмы умереннокалиевой высоко-титанистой серии, характерные для тыловых частей развитых островных дуг, могут формироваться за счет плавления пироксенитов при давлении 8-16 кбар, температуре 1230-1280°C и степени плавления 5-20%. Комплиментарность спектров рассеянных элементов низкокалиевым базальтам активного вулканического фронта показывает возможность образования пироксенитов как реститов после выплавления магм активного вулканического фронта.

Связь вулканизма с эволюцией островных дуг (обоснование третьего защищаемого положения).

В данном разделе обсуждается связь островодужного вулканизма с динамикой развития и эволюцией островодужных систем. Ключевыми аспектами проблемы являются проявления типовых островодужных серий в различных зонах островодужной системы и на различных этапах ее развития. В работе выделяется несколько стадий развития островодужной системы, каждая из которых характеризуется собственной формацией вулканических пород.

Для примитивных островных дуг характерны слабо дифференцированные вулканиты базальтового и андезибазальтового состава с высокомагнезиальным оливином (Fo_{90-94}) во вкрапленниках. Породы имеют ярко выраженную островодужную геохимическую специфику, которая

выражается в обогащении легкими РЗЭ относительно тяжелых РЗЭ, отрицательными аномалиями содержаний высокозарядных элементов (Nb, Ta), ярко выраженными положительными аномалиями Sr и Pb относительно РЗЭ в нормализованных к составу мантии или MORB спектрах микроэлементов. Кислые вулканы, андезиты и щелочные серии на примитивных дугах практически отсутствуют.

Переход к развитым островным дугам, формирующимся на фундаменте сложенном продуктами магматизма примитивных островных дуг, характеризуется в первую очередь увеличением роли кислого вулканизма и образованием крупных кальдерных структур. При этом происходит формирование вулканического фронта, представленного преимущественно андезитовыми вулканами. Этот этап часто сопровождается крупными тектоническими поднятиями, что фиксируется на многих островных дугах в формировании двух и более структурных этажей. На данном этапе в пределах вулканического фронта преобладают низкокалиевые вулканические серии, отличающиеся от низкокалиевых вулканических примитивных островных дуг следующими особенностями. Во-первых, слабо дифференцированные разности представлены низкомагнезиальными андезибазальтами и, реже, базальтами с наиболее ранним оливином Fo_{79-82} . Высокомагнезиальные базальты, которые могут встречаться в этих же зонах, как правило, относятся к умеренно-калиевым сериям, т.е. не могут являться родоначальными магмами для низкокалиевых серий. Геохимия магм вулканического фронта развитых островных дуг отличается как от высокомагнезиальных базальтов примитивных островных дуг, так и от высокомагнезиальных базальтов развитых островных дуг обедненными по отношению к MORB спектрами в области легких REE. Отрицательная аномалия высокозарядных элементов более выражена, чем в базальтах примитивных островных дуг. Содержания Nb и Ta даже ниже содержаний в MORB.

В данной работе выделяется стадия зрелой островной дуги, которая характеризуется наряду с сохранением вулканизма развитой островной дуги проявлением субщелочных и щелочных вулканических, основная локализация которых наблюдается в тыловых частях островодужной системы в пределах отмирающего вулканического фронта предыдущего этапа развития островодужной системы или в пределах крупных поперечных тектонических нарушений. На примере Камчатки и Японии показано, что зональное изменение состава в пространстве вулканических этих серий относительно существующей на данной момент зоны субдукции практически отсутствует. Классическая зональность островных дуг по щелочности вулканических,

выделенная японскими геологами в середине прошлого века, проявляется в только количественном распределении низкокальциевых, субщелочных и щелочных вулканитов в пределах зрелых островных дуг. Геохимия субщелочных и щелочных островодужных серий заметно отличается от геохимии низкокальциевых вулканитов. В первую очередь, в субщелочных и щелочных вулканитах слабо выражен или даже отсутствует минимум содержания высокозарядных элементов, калия и легких редкоземельных элементов.

Для зрелых островных дуг (Камчатка, Япония, Малые Антилы и т.д.) характерно двучленное строение, при котором тыловая дуга представляет собой отмирающий вулканический фронт предыдущего этапа островодужной активности. Современная активность тыловой дуги связана с проявлениями кислого, субщелочного и щелочного вулканизма. Между фронтальной и тыловой дугами существует режим растяжения, что обуславливает заложение рифтовых островодужных структур и, при их развитии, образование задугового бассейна и зон рассеянного спрединга.

В данной работе предлагается для обсуждения геодинамическая модель развития островодужной системы, которая удовлетворительно объясняет вышеизложенную специфику проявления различных островодужных серий, связывая изменение характера вулканизма в различных зонах островной дуги с вовлечением дополнительных источников магмогенерации по мере эволюции островодужной системы. На рис. 6 представлена упрощенная схема, демонстрирующая различные этапы развития островодужной системы.

На стадии примитивной островной дуги доминирует один источник магмогенерации, связанный с плавлением мантийного клина под воздействием флюида, отделяющегося от субдуцированной океанической плиты. При этом образуются магнезиальные низкокальциевые базальты, с ярко выраженной островодужной геохимической спецификой за счет привнесения легкоподвижных компонентов флюидом из субдуцированной плиты. Содержания высокозарядных элементов остаются на уровне MORB (которые образуются за счет декомпрессионного плавления из сходной по составу мантии).

По мере эволюции островной дуги постепенно увеличивается мощность островодужной коры, что приводит к возможности дифференциации магм при их подъеме. Островодужная кора примитивных островных дуг сложена преимущественно вулканогенным материалом, который легко подвергается метаморфизму фации зеленых сланцев. Глобальный масштаб низкотемпературного метаморфизма островодужных вулканитов

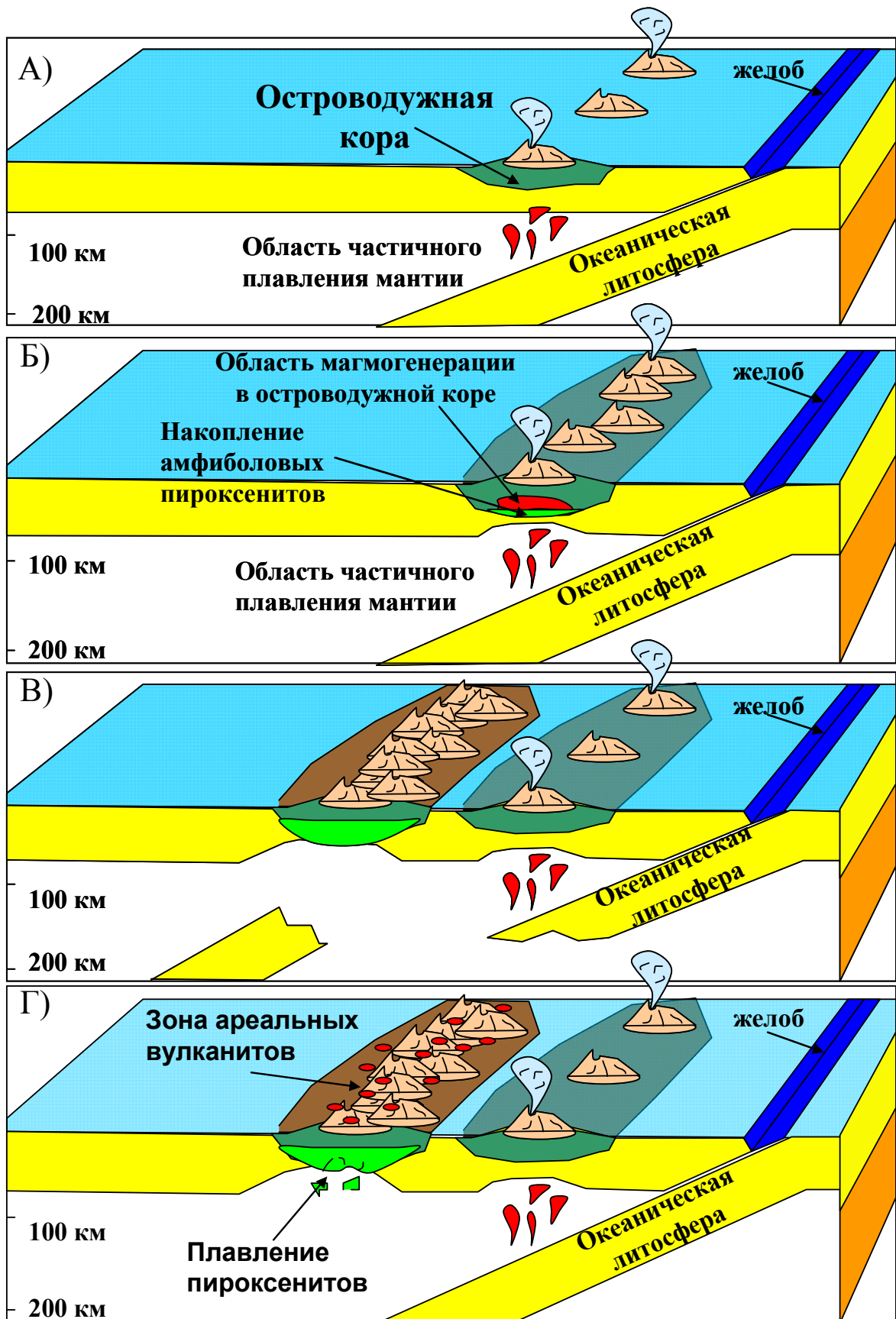


Рис.6 Схема, демонстрирующая модель эволюции островодужной системы. А) Стадия примитивной островной дуги; Б) Стадия развитой островной дуги; В) Формирование двучленной островодужной системы; Г) Стадия зрелой островодужной системы

демонстрируется тем, что практически все вулканические породы старше нескольких млн. лет частично или полностью метаморфизованы. Особенно быстро зеленые сланцы развиваются в подводных условиях, характерных для примитивных островных дуг. По мере формирования островодужной коры и накоплению вулканитов, нижние части коры подвергаются метаморфизму амфиболитовой фации. Таким образом, островодужная кора в момент перехода от стадии примитивной островной дуги к стадии развитой островной дуги, сложена не базальтами, а метаморфизованными в зеленосланцевой и амфиболитовой фациях породами.

Переход от стадии примитивной дуги к стадии развитой дуги характеризуется появлением большого объема кислых вулканитов и андезитов. Этот переход объясняется появлением новой области магмогенерации за счет частичного плавления островодужной коры [Tamura, Tatsumi, 2002; Petford, Gallagher, 2001; Dufek, Bergantz, 2005]. При частичном плавлении зеленых сланцев образуются кислые расплавы [Montel, Vielzeuf, 1997]. При частичном плавлении амфиболитов при низких давлениях также образуются кислые расплавы [Beard, Lofgren, 1991; Johannes, Holtz, 1996; Borg, Clyne, 1998; Nakajima, Arima, 1998; Lupulescu, Watson, 1999] или амфиболиты подвергаются гранитизации [Selbekk et al., 2002]. Эксперименты [Rapp, Watson, 1995; Gardien et al., 2000] и численное моделирование [Kimura et al., 2002] показали, что в водонасыщенной системе при давлениях 8-10 кбар, соответствующих низам островодужной коры развитых островных дуг возможно плавление амфиболитов с образованием андезибазальтовых и даже базальтовых (при больших степенях плавления) расплавов. При этом, амфибол остается в рестите от плавления. Если, в качестве субстрата выступают амфиболиты, которые по химическому составу соответствуют магнезиальным базальтам примитивных островных дуг то, отношения радиогенных изотопов будут полностью наследоваться от этих базальтов. Образующиеся расплавы будут существенно менее магнезиальны, чем исходный субстрат. Кроме этого, наличие амфибола в рестите связывает существенную часть легких REE, Nb, Ti и калия. Таким образом, при плавлении вещества примитивных островных дуг в условиях низов мощной островодужной коры появляются магмы, обладающие всеми специфическими чертами, отмеченными выше для низкокалиевых серий вулканических фронтов развитых островных дуг.

Вполне вероятны случаи, при которых магмогенерация происходит одновременно на нескольких уровнях островодужной системы: 1) в мантии, за счет привнесенного флюида продолжают образовываться магнезиальные

низкокальциевые базальты 2) в нижних частях островодужной коры происходит плавление амфиболитов с образованием низкокальциевых магм 3) в средних и верхних частях островодужной коры происходит генерация кислых магм. Поднимающиеся магмы из различных источников могут взаимодействовать друг с другом на уровне промежуточных очагов и изливаться в одних и тех вулканических центрах, образуя гибридные породы. Поэтому, четкое разделение вулканитов по типам магмогенерации возможно не для всех вулканических центров.

Переход от стадии развитой островной дуги к зрелой островной дуге связан с перескоком зоны субдукции по направлению к океану. Такой перескок характерен для подавляющего большинства известных островных дуг и обуславливает их двучленное строение. Фронтальная дуга начинает формироваться по сценарию, описанному выше, тогда как бывший вулканический фронт, оказавшийся в тыловой зоне претерпевает дальнейшую эволюцию. Поскольку поток флюида из субдуцированной плиты прекращается, останавливается генерация мантийных расплавов и плавление островодужной коры. На этой стадии вулканическая деятельность практически прекращается и может носить только реликтовый характер. Строение этой зоны островодужной системы характеризуется дифференцированными частично метаморфизованными вулканитами в верхних структурных ярусах и породами, оставшимися от частичного плавления островодужной коры в нижних структурных ярусах. Как было рассмотрено выше, плавление в условиях низов островодужной коры может приводить к накоплению амфибола в рестите, что при условии частичной дегидратации и дальнейшего метаморфизма приводит к образованию пироксенитов, или амфиболовых пироксенитов. [Kelemen et al., 2003] показали на основе масс-баланса островодужной системы и детально изученных разрезов палеодуги Талкитна (Аляска), что для низов островодужной коры характерно присутствие пироксенитов. Если эти пироксениты образовались как реститы при генерации низкокальциевых серий вулканического фронта, то они по составу должны быть комплементарны этим сериям и обогащены калием, титаном, ниобием и легкими REE по сравнению с первоначальными амфиболитами, отвечавшими по составу островодужным базальтам примитивных островных дуг. [Jull, Kelemen, 2001] показали, что в условиях нижней части островодужной коры пироксениты будут тяжелее, чем подстилающая их мантия при достижении некоторой критической мощности островодужной коры, что приводит к их гравитационной неустойчивости. Можно предположить, что стадия

отмирающего вулканического фронта, на которой островодужная кора перестает подпитываться мантийными расплавами и флюидопотоками, является идеальной для создания условий, при которых происходит деламинация (по Kelemen et al., 2003) основной части пироксенитов нижней части островодужной коры. При этом, погружение блоков пироксенитов и амфиболовых пироксенитов в мантию должно вызывать формирование расплавов как за счет частичного плавления этих пироксенитов, так и за счет возмущений в мантии возникающих вследствие этого погружения. Таким образом, исходя из предложенной модели, в тыловой зоне островных дуг после перерыва в вулканической активности начинает формироваться новая область магмогенерации, связанная с деламинацией и дегидратацией пироксенитов и амфиболовых пироксенитов нижней части островодужной коры. Исходя из состава пироксенитов, рассмотренного выше, расплавы должны быть обогащены легкими REE, Nb, Ti, калием по сравнению с низкокалиевыми «типично островодужными» сериями. Такая геохимическая специфика как раз и характерна для субщелочных вулканитов, появляющихся на зрелой стадии развития островодужной системы. Вполне возможно, что теплового потока, создаваемого процессами деламинации и поднимающимися магмами, на некоторой стадии окажется достаточно, чтобы вызвать дополнительное плавление в средних и верхних частях островодужной коры, что может проявиться в появлении кислых магм. Если принять тезис о локализации и гибридизации расплавов из разных зон магмогенерации, рассмотренный выше, то эти кислые вулканиты также могут иметь субщелочную или даже щелочную специфику.

Таким образом, по мере эволюции дуги и развития зрелой островодужной системы к доминирующему на стадии примитивной островной дуги плавлению мантийного источника добавляются коровые источники магмогенерации. Специфика вулканических серий развитых островных дуг преимущественно определяется плавлением пород корового субстрата, таких как амфиболиты и амфиболовые пироксениты. Вследствие общей эволюции островодужной системы и последовательному смещению вулканического фронта навстречу субдуцирующей плите на зрелых островных дугах может возникать геохимическая зональность синхронного вулканизма в пределах двух различных по условиям магмогенерации зон.

Петрологические аспекты гибризма кислых и основных магм в долгоживущих вулканических центрах (обоснование четвертого защищаемого положения).

Смешение магм в пределах островодужной системы проявляется в антидромных последовательностях извержений, синхронном извержении базальтов и гибридных пород, резорбции вкрапленников, сложной зональности минералов, неравновесных ассоциациях вкрапленников, возникновению реакционных кайм одних минералов вокруг других, обилию мафических включений, наличию контрастных групп расплавных включений [Фролова, Бурикова, 1997; Биндеман, 1995; Bacon, 1986; Murphy et al., 2000; Наумов и др., 1997; Eichelberger et al., 2006; Плечов и др. 2000; 2005, 2008; Трусов, Плечов, 2005].

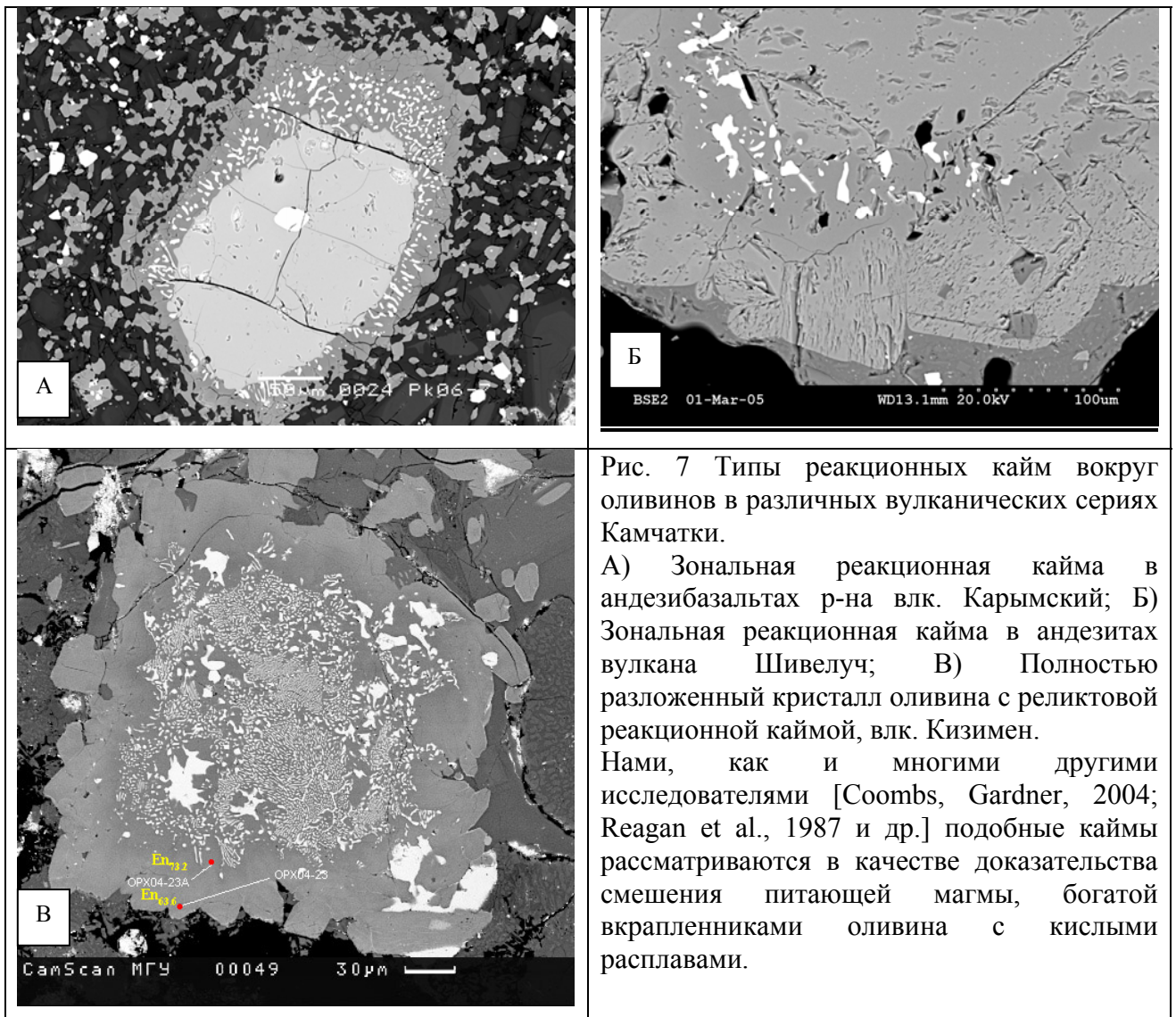
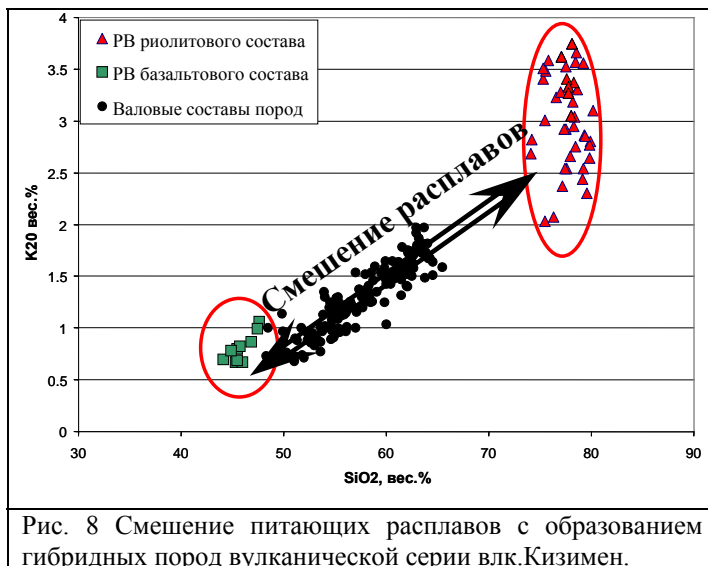


Рис. 7 Типы реакционных кайм вокруг оливинов в различных вулканических сериях Камчатки.
 А) Зональная реакционная кайма в андезибазальтах р-на влк. Карымский; Б) Зональная реакционная кайма в андезитах вулкана Шивелуч; В) Полностью разложенный кристалл оливина с реликтовой реакционной каймой, влк. Кизимен.
 Нами, как и многими другими исследователями [Coombs, Gardner, 2004; Reagan et al., 1987 и др.] подобные каймы рассматриваются в качестве доказательства смешения питающей магмы, богатой вкрапленниками оливина с кислыми расплавами.



Для вулкана Кизимен были изучены расплавные включения во вкрапленниках оливина, ортопироксена и плагиоклаза. Включения образуют две контрастные группы базальтового и риолитового состава (рис.8), тогда как валовые составы пород расположены между

этим группами. Из этих соотношений следует, что практически все породы влк. Кизимен могут являться гибридными, образовавшимися за счет смешения базальтового и риолитового расплавов в различных пропорциях.

Предлагается следующий механизм взаимодействия инъекций основной магмы с веществом приповерхностных очагов кислого состава [Плечов и др., 2008с]:

Инъекции основной магмы поднимаются и внедряются в приповерхностный очаг в виде даек [Murphy et al., 2000]. При попадании в вязкую среду кислых расплавов они продолжают подниматься вверх, постепенно деформируясь за счет сопротивления вязкой среды и возникающих конвекционных течений [Perugini et al., 2007]. При этом, происходит фрагментация внедряющейся магмы на глобулы различного размера, распределяющиеся по объему магматического очага. При движении глобул в вязкой среде возможен механический захват посторонних вкрапленников из вмещающей магмы. Базальтовая магма начинает кристаллизоваться вследствие резкого контраста температур. Эта кристаллизация носит преимущественно фракционный характер так как время кристаллизации мало по сравнению с временем, необходимым для переуравновешивания ранее кристаллизовавшихся вкрапленников. Окружающая магма прогревается за счет теплообмена с внедрившейся порцией базальтов и выделившейся теплотой при кристаллизации базальтовых глобул.

Уравновешивание по температуре базальтовых глобулей с окружающим расплавом вызывает массовую кристаллизацию минералов из базальтового расплава. Количество и состав образующегося при этом остаточного расплава внутри глобулей будет являться преимущественно функцией температуры, к которой стремится магматическая система при термическом равновесии. Поскольку температура внутри и снаружи глобулей после уравновешивания одинакова, мы можем ожидать близкие по составу расплавы как внутри глобулей, так и в окружающей их магме. Время, в течение которого может существовать в неизменном виде остаточный расплав, ограничено только такими процессами, происходящими в очаге, как общее остывание магматической системы, вынос данного материала на поверхность в результате извержения или инъекции свежих порций магмы в магматический очаг.

После установления термического равновесия частично раскристаллизованные глобулы, находящиеся в магматическом очаге в течение долгого времени, будут постепенно распадаться на отдельные кристаллы и гломеропорфировые сростки. Остаточный расплав из глобулей при этом процессе будет иметь возможность смешаться с матричным расплавом окружающей магмы. Фемические минералы (например, оливин) сформированные при кристаллизации базальтовой магмы реагируют с остаточным расплавом и полностью дезинтегрируются в течение 4-12 лет в зависимости от размера зерен [Coombs et al., 2004; Dirksen et al., 2006]. Пироксен может диффузионно переуравновешиваться с магмой примерно за эти же интервалы времени. Скорости диффузии CaAl – NaSi в плагиоклазе крайне низки, поэтому плагиоклазы зачастую сохраняют сложную зональность в течение всей жизни магматического очага.

Процесс взаимодействия базальтов и риолитов при подчиненном количестве базальтов проходит в несколько стадий. На первой стадии базальтовая магма кристаллизуется, формируя кристаллы и остаточный расплав. На второй стадии остаточный расплав смешивается с матричным расплавом вмещающей магмы, а кристаллы частично или полностью переуравновешиваются с этим же матричным расплавом. При новых

инъекциях базальтов и прогреве магмы очага эти кристаллы могут частично или полностью растворяться, адаптируя состав матричного расплава к более высокой температуре.

Результаты численного моделирования эволюции базальтовых глобул в кислом магматическом очаге для вулкана Кизимен с учетом кристаллизации базальтового расплава и теплообмена с окружающей магмой [Плечов и др., 2008с] показали, что время достижения теплового равновесия от радиуса капли и процента базальта в системе может быть описана выражением

$$t = m\alpha^q R^2,$$

где t – время в секундах, α – объёмная доля базальтов, R – радиус базальтовых капель в метрах, m и q – коэффициенты.

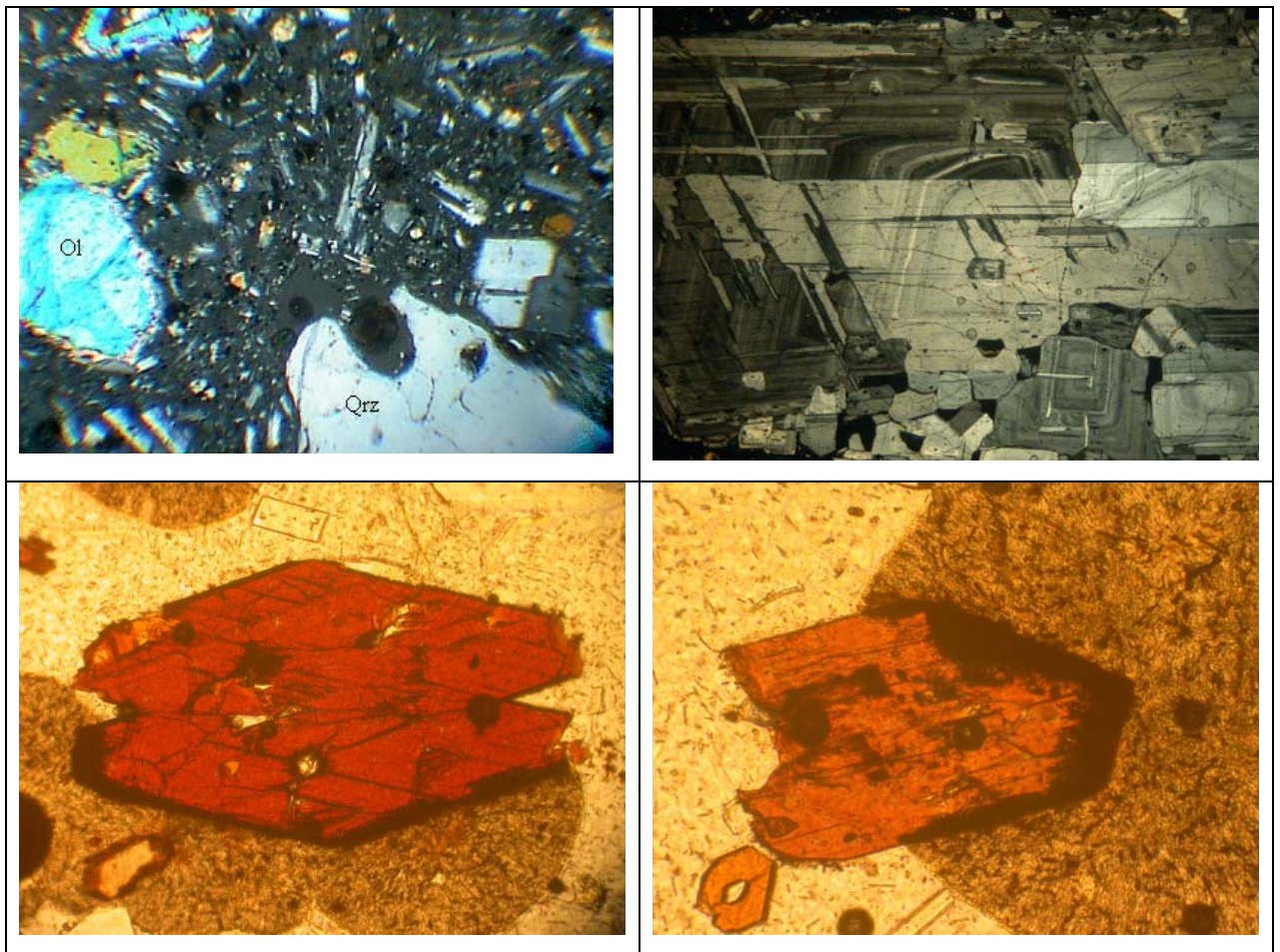


Рис.9 Наиболее характерные признаки смешения основной и кислой магмы в продуктах извержения вулкана Кизимен, Камчатка. А) Вкрапленники кварца и оливина в основной массе, состоящей из плагиоклаза, ортопироксена, рудных минералов и кислого стекла. Б) Сложнозональные вкрапленники плагиоклаза; В, Г) вкрапленники роговой обманки на границе контрастных по составу расплавов.

Для определенных параметров базальтовой и риолитовой магм вулкана Кизимен уравнение имеет вид $t = 847558\alpha^{-0,577}R^2$ и, при размерах глобулей оцененных по размеру меланократовых включений 5-30 см и доли базальта, не превышающей 30%, время достижения термического равновесия лежит в пределах 2-101 часов с момента внедрения и фрагментации базальтовой магмы.

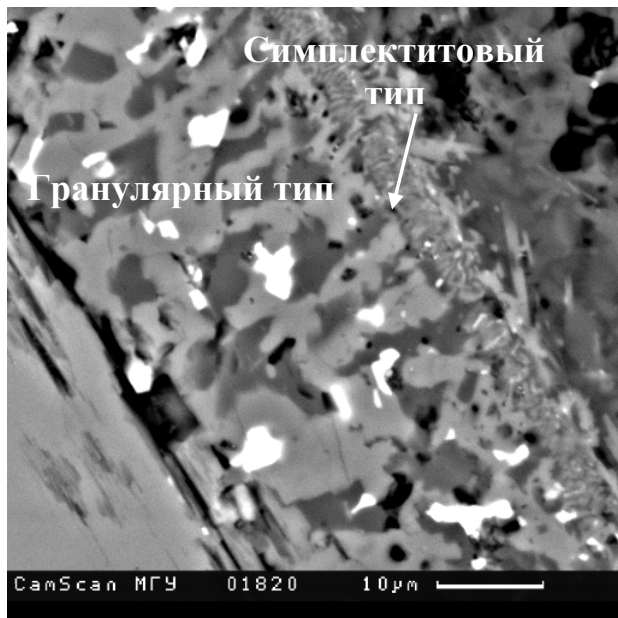


Рис.10 Участок реакционной каймы «замещения», вулкан Безымянный.

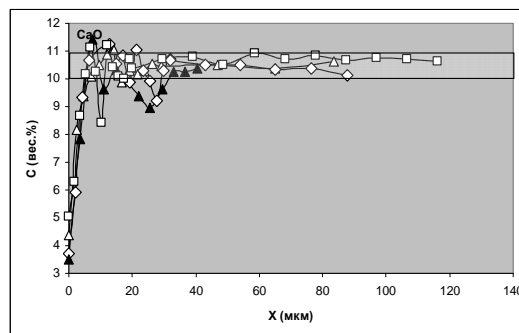
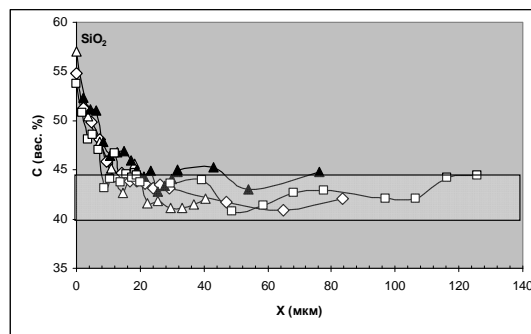


Рис.11 Профили через участки с симплектитовым типом каймы «замещения», вулкан Безымянный. Выделенными участками показаны содержания компонентов в роговой обманке.

Реакционные каймы вокруг вкрапленников роговой обманки и оливина широко распространены в островодужных вулканитах. Они представляют собой незавершенные реакции распада вкрапленников и могут быть использованы для оценки условий и временных характеристик процессов, происходящих в магматическом очаге и при подъеме магмы к поверхности.

На примере реакционных кайм вокруг оливина и роговой обманки в продуктах извержения 8 различных островодужных вулканов было доказано, что все они подчиняются двум правилам:

- а) Реакционные каймы образуются только на контакте с расплавом.

б) Во всех типах кайм наблюдается зональность относительно контакта с реликтами зерен (рис. 10-11).

Зональность может быть выражена структурно (уменьшение размеров зерен по направлению от роговой обманки к матриксу), по валовому составу кайм (рис.11) и по минеральному составу, слагающих кайму агрегатов.

3. Зональность кайм по минеральному составу.

В каймах «замещения» вулкана Безымянный отчетливо выделяются три зоны (Рис.12):

1 – Орх + Pl + Ti-Mag; 2 – Орх + Pl; 3 – Орх.

В каймах «растворения» зональность проявлена главным образом в составе зерен пироксена. Зональность кайм растворения с вулкана Унзен представлена зональными зернами пироксена с клинопироксеном в ядре и ортопироксеновой внешней зоной (Рис.12). В каймах «растворения» вулкана Сент Хеленс по составу зерен пироксена также выделяются три зоны (Рис.12): 1 – Срх; 2 – Pг; 3 – Орх.

На примере кайм замещения в продуктах извержения 1956 г влк. Безымянный нами было продемонстрировано отсутствие зависимости мощности каймы от кристаллографического направления, в котором эта кайма развивается [Плечов и др., 2008а]. Мощности кайм измерялись на разных гранях с учетом ориентировки данного разреза относительно кристалла роговой обманки.

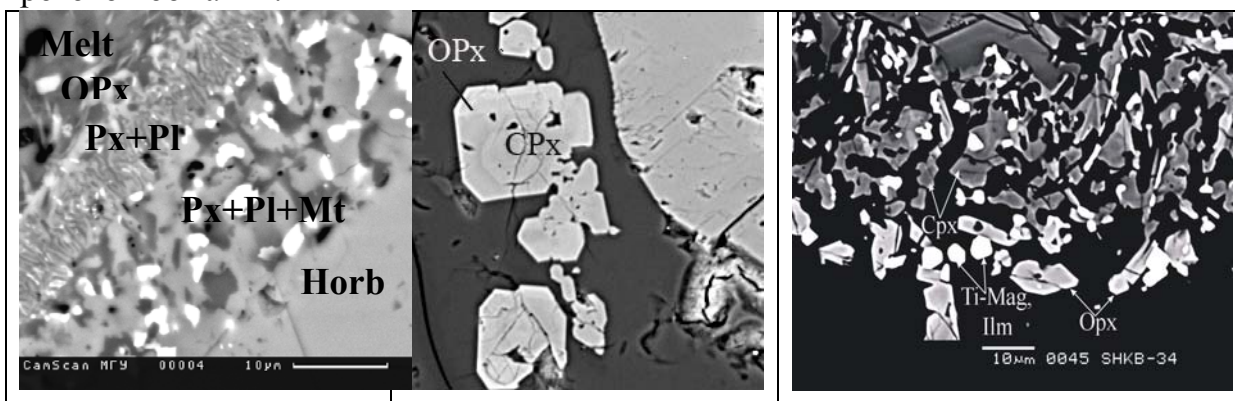


Рис.12. Основные типы реакционных кайм вокруг роговых обманок. А) каймы «замещения» (влк.Безымянный, Камчатка); Б) каймы «растворения» (влк.Унзен, Япония); В) каймы «растворения» (влк. Сент Хеленс, США)

По экспериментальным данным [Плечов и др., 2008а] было установлено, что полное разложение роговой обманки происходит достаточно быстро даже в водонасыщенных условиях (первые сутки), если роговая обманка находится

вне поля стабильности при температурах больше или равных 1000°C. Редкие находки таких агрегатов разложения в природных образцах роговообманковых андезитов и дацитов свидетельствуют о том, что условия полной неустойчивости роговой обманки достигаются крайне редко.

Гораздо чаще в природных условиях происходит формирование реакционных кайм, время образования которых оценивается от 4 до 50 дней.

Согласно предлагаемой модели, образование кайм опацификации роговых обманок происходит за счет неравновесности с окружающим расплавом, возникающей при смешении магм или резком изменении физико-химических параметров. Процесс формирования каймы опацификации проходит в два этапа.

1. Во время первого этапа роговая обманка стремится прийти в равновесие с окружающим расплавом путем диффузионного обмена компонентами. Факторами, контролирующим скорость протекания процесса являются градиенты концентраций компонентов и их коэффициенты диффузии в роговой обманке. Если равновесие достигается, то образование опацифированной каймы не происходит, а процесс переуравновешивания выражается в образовании зональной внешней каймы. Если в ходе переуравновешивания достигается предел стабильности роговой обманки, происходит разложение на полиминеральный агрегат и начало образования каймы.
2. Во время второго этапа происходит образование каймы в направлении центра зерна. Диффузионный обмен с расплавом осуществляется через зону вновь образованной каймы. Контролирующими факторами являются градиенты концентраций и скорость диффузии компонентов в кайме, которая зависит от геометрии каймы, ее структуры и коэффициентов диффузии компонентов в межинтерстициальном расплаве. В случае если реакция проходит до конца, то роговая обманка полностью замещается стабильным в новых условиях минеральным парагенезисом.

Данный двухстадийный механизм предлагается для образования кайм вокруг минералов переменного состава за счет реакции с окружающим расплавом. При этом, мощность каймы выражается как функция времени реакционного соотношения роговой обманки с окружающим расплавом:

$$x(t) = \sqrt{D(t - t_0)},$$

где x – мощность каймы, t – время нахождения минерала в реакционном соотношении с окружающим расплавом, t_0 – «время покоя», в течение

которого образование каймы не происходит, D – коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость процесса.

«Время покоя» (t_0) отражает длительность первого этапа разложения и контролируется скоростью твердофазной диффузии в минерале. В экспериментах с оливином [Coombs, Gardner, 2004], обладающим высокими скоростями диффузии Fe и Mg, время t_0 близко к нулю, а для роговой обманки может составлять несколько суток [Rutherford, Hill, 1993].

Коэффициент D характеризует скорость процесса контролирующего рост каймы. Экспериментально определенные коэффициенты D на два порядка больше, чем коэффициенты диффузии в роговой обманке, и с точностью до порядка совпадают со скоростями диффузии в расплаве. Было показано, что рост каймы опацификации в роговых обманках контролируется диффузией в расплаве, заполняющем интерстициальное пространство каймы.

Время образования реакционных кайм вокруг роговых обманок в андезитах извержения 30 марта 1956 г. лежит в диапазоне 4-30 дней [Плечов и др., 2008а]. Время, оцененное по реакционным каймам вокруг оливина в продуктах извержения 2001-2004 гг. вулкана Шивелуч, лежит в диапазоне 13-50 дней [Dirksen et al., 2006]. Оцененные интервалы соответствуют времени прохождения реакций разложения с момента инъекции порций горячих базальтовых расплавов до закалки системы в момент извержения. Оценки времени имеют тот же порядок величин, что и теоретические оценки времени, требующегося для установления термического равновесия, проведенными нами для магматической системы вулкана Кизимен [Плечов др., 2008с]. Таким образом, можно заключить, что внедряющаяся в кислый приповерхностный очаг порция базальтовой магмы фрагментируется на отдельные глобулы, которые распределяясь по некоторому объему очага, вызывают его прогрев в течение первых часов-суток после внедрения. Данный процесс приводит к возникновению гидродинамической неустойчивости в области магматического очага и вызывает извержение вулкана в течение нескольких суток – первых месяцев после внедрения.

Заключение.

В рамках диссертационной работы были получены следующие принципиально важные результаты:

- 1) Разработан программный комплекс Petrolog-III с принципиально новыми возможностями моделирования прямой и обратной кристаллизации островодужных магм основного состава к которым относятся 1) моделирование равновесной кристаллизации с учетом прохождения

перитектических реакций; 2) возможность моделирования при различной степени фракционирования для каждого минерала в отдельности 3) возможность моделирования полибарической кристаллизации с заданием серии промежуточных очагов 4) моделирование кристаллизации в водонасыщенных условиях с количественной оценкой дегазации; 5) возможность моделирования поведения рассеянных элементов на основе сложных моделей распределения (например, Beattie, 1993; Kinzler et al., 1990);

2) Создана модель эволюции островодужных систем, объясняющая последовательность образования островодужных вулканических серий и их положение в структуре островодужных систем. В рамках модели показана возможность образования низкокалийевых и умереннокалийевых вулканических серий развитых островных дуг за счет последовательного плавления субстрата нижней части островодужной коры.

3) Показана ведущая роль гибридизма в формировании серий пород долгоживущих островодужных вулканических центров. Предложен механизм смешения базальтовой и риолитовой магмы, который подтвержден природными наблюдениями и методами численного моделирования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Плечов П.Ю., Цай А.Е., Щербаков В.Д., Дирксен О.В. Роговые обманки в андезитах извержения 30 марта 1956 г. вулкана Безымянный и условия их опацификации // Петрология, 2008, т.16, № 1, С. 21-37.
2. Плечов П.Ю., Шишкина Т.А., Ермаков В.А., Портнягин М.В. Условия формирования алливалитов (оливин-анортитовых кристаллических включений) Курило-Камчатской островной дуги. // Петрология, 2008, т.16, №3, С 248-276
3. Плечов П.Ю., Фомин И.С., Мельник О.Э., Горохова Н.В. Эволюция состава расплава при внедрении базальтов в кислый магматический очаг. // Вестник МГУ, серия IV, геология, № 4, 2008, С. 247-257.
4. Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P., Mironov N., Khubunaya S. Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H₂O, S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc // Earth and Planetary Science Letters, V. 255, 2007, pp. 53-69.
5. Dirksen O., Humphreys M.C.S., Plechov P., Melnik O., Demyanchuk Y., Sparks R.S.J., Mahony S. The 2001-2004 dome-forming eruption of Shiveluch volcano, Kamchatka: Observation, petrological investigation and numerical modelling // Journal of Volcanic and Geothermal Research, 2006, V. 155, Issues 3-4, pp. 201-226.
6. Зиновьева Н.Г., Плечов П.Ю., Латышев Н.П., Грановский Л.Б. Термобарометрия обыкновенных хондритов // Доклады РАН, сер. IV, Геология, 2006, т. 408, № 6, С. 788-791.
7. Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Матвеев С.В., Осипенко А.Б., Миронов Н.Л. Петрология "авачитов" -высокомагнезиальных базальтов Авачинского вулкана (Камчатка): I. Общая характеристика, состав пород и минералов. // Петрология, 2005, т.13, № 2, С. 115-138.

8. Портнягин М.В., Миронов Н.Л., Матвеев С.В., Плечов П.Ю. Петрология "авачитов" - высокомагнезиальных базальтов Авачинского вулкана (Камчатка): II. Расплавные включения в оливине. // Петрология, 2005, т.13, № 4. С. 358-388.
9. Плечов П.Ю., Серебряков Н.С. Реликты аполейцитовых пород в рихторритовом комплексе Хибинского массива и их генетическое значение // Доклады РАН, серия IV, геология, 2004, том 394, N5, С. 673-676.
10. Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Хубуная С.А. Заключительные этапы эволюции магм Ключевского вулкана (Камчатка) по данным изучения расплавных включений в минералах высокоглиноземистых базальтов. // Петрология, 2001, 9, №1, С. 51-69
11. Фролова Т.И., Плечов П.Ю., Тихомиров П.Л., Чураков С.В. Расплавные включения в минералах алливалитов Курило-Камчатской островной дуги // Геохимия, 2001, 39, № 4, С. 336-346
12. Граменицкий Е.Н., Котельников А.Р., Батанова А.М., Щекина Т.И., Плечов П.Ю. "Экспериментальная и техническая петрология", М., Научный Мир, 2000, 415 с.
13. Плечов П.Ю., Миронов Н.Л., Плечова А.А., Хубуная С.А. Особенности химического состава и образования расплавных включений в плагиоклазах потока Апахончич, влк. Ключевской (Камчатка) // Геохимия, 2000, №1, С. 39-47
14. Расс И.Т., Плечов П.Ю. Включения расплавов в оливинах оливин-мелилитовой породы, массив Гули, северо-запад Сибирской платформы. // Доклады РАН, 2000, т.375, №3, С. 384-389.
15. Плечов, П., Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Хубуная С.А. Эволюция высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана. // Труды ВНИИСИМС. Синтез минералов и методы их исследования. Геология месторождений пьезооптического и камнесамоцветного сырья XVI, 2000, 301-312.
16. Тетроева С. А., Плечов П.Ю. Петрология пород Камбального вулкана по данным изучения расплавных включений. // Труды ВНИИСИМС. Синтез минералов и методы их исследования. Геология месторождений пьезооптического и камнесамоцветного сырья XVI, 2000, С. 313-321.
17. Плечов П.Ю., Граменицкий Е.Н., Котельников А.Р. Искусственные расплавные включения в гранитной системе.// Доклады РАН, сер.IV, геология 364(1), 1999, С. 110-113.
18. Pletchov P.Yu., Gerya T.V. Effect of H₂O on plagioclase-melt equilibrium. // Experiment in GeoSciences 7(2), 1998, pp. 7-9.
19. Плечов П.Ю., Синогейкин С.В. Генезис апатит-нефелиновых руд Хибинского массива. // Вестник МГУ, сер. 4, 1998, №1, С. 77-80.
20. Шишкина Т.А., Плечов П.Ю. Условия формирования алливалитов вулкана Ксудач (Камчатка) по данным изучения минералов и расплавных включений, Тезисы VIII Международной конференции "Новые идеи в науках о Земле", Москва, 10-13 апреля 2007 г, т.3, 2007, С. 320-322.
21. Мельник О.Э., Бармин А.А., Плечов П.Ю. "Гидродинамические задачи в вулканологии"// Зимняя школа по механике сплошных сред (пятнадцатая). Сборник статей, часть 1, ИМСС УрО РАН, Пермь, 2007, с 77-80
22. Плечов П.Ю., Мельник О.Э., Бармин А.А. "Применение методов гидромеханики и петрологии к изучению механизмов подъема магмы и вулканических извержений", Ломоносовские чтения, секция Геологии, апрель 2007, <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1179216&uri=plechov.html>

23. Бармин А.А., Мельник О.Э., Плечов П.Ю. "Применение методов гидромеханики и петрологии к изучению механизмов подъема магмы и вулканических извержений", Ломоносовские чтения, секция Механики, апрель 2007.
24. Плечов П.Ю., Данюшевский Л.В. PETROLOG III. Моделирование равновесной и фракционной кристаллизации // Материалы ЭСМПГ-2006, Электронный научно-информационный журнал "Вестник отделения наук о Земле РАН" №1(24), 2006, URL:http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2006/informbul-1_2006/term-24.pdf
25. Плечов П.Ю., Цай А.Е., Щербаков В.Д. Роговые обманки андезитов вулкана Безымянный и условия их разложения на плагиоклаз-ортопироксен-магнетитовый агрегат // Материалы ЭСМПГ-2006, Электронный научно-информационный журнал "Вестник отделения наук о Земле РАН" №1(24), 2006, URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2006/informbul-1_2006/term-25.pdf
26. Шишкина Т.А., Плечов П.Ю. (геол.ф-т МГУ) Условия формирования алливалитов Курило-Камчатской островной дуги // Материалы ЭСМПГ-2006, Электронный научно-информационный журнал "Вестник отделения наук о Земле РАН" №1(24), 2006, URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2006/informbul-1_2006/term-28.pdf
27. Плечов П.Ю., Пузанков М.Ю., Дирксен О.В., Латышев Н.П. Причины роста экструзивного купола вулкана Шивелуч // В кн. "Происхождение магматических пород. Материалы международного (X всероссийского) петрографического совещания (г. Апатиты, 20-22 июня 2005 г.)", т.2 - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН .2005, С. 94-97.
28. Трусов С.В., Плечов П.Ю. Образование антидромной серии вулкана Кизимен (Камчатка) // В кн. "Происхождение магматических пород. Материалы международного (X всероссийского) петрографического совещания (г. Апатиты, 20-22 июня 2005 г.)", т.2 - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН .2005, С.48-51.
29. Шишкина Т.А., Плечов П.Ю. Генетическая связь алливалитов и базальтов вулкана Головина (о.Кунашир, Курилы) по данным изучения расплавных включений // Петрография XXI века. Материалы X Всероссийского Международного петрографического совещания. - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005, С.102-106
30. Pletchov P.Yu., Zinovieva N.G., Latyshev N.P., Granovsky L.B. Evaluation of the crystallization temperatures and pressures for clinopyroxene in the parental bodies of ordinary chondrites // Lunar and Planetary Science XXXIV, Houston (CD-ROM), 2005, 1038
31. Zinovieva N.G., Pletchov P.Yu., Latyshev N.P., Granovsky L.B. Physicochemical conditions of clinopyroxene crystallization in the parental bodies of ordinary chondrites // Lunar and Planetary Science XXXIV, Houston (CD-ROM), 2005, 1041
32. Almeev R., Ariskin A., Pletchov P. Phase equilibria simulations in tholeiitic system: Melts versus Comagmat // Geophys. Research Abstracts, v.6, N 05405
33. Almeev R., Ariskin A., Pletchov P. Calculations of mineral-melt equilibria in tholeiitic system: MELTS versus COMAGMAT/ / Lithos, Volume: 73, Issue: 1-2, Supplement, 2004, pp.1-125.
34. Бычков К.А., Арискин А.А., Плечов П.Ю. Развитие модели КОМАГМАТ: версия под WINDOWS. Тез. Докл. Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, Москва, ГЕОХИ-ИЭМ, 2004

35. Япаскорт В.О., Плечов П.Ю. Симплектиты клинопироксена и плагиоклаза в гранат-клинопироксеновых породах Кольского полуострова: продукты реакций прогрессивного гранулитового метаморфизма или результат декомпрессионного разложения омфацита? // Тезисы научной конференции ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2004 года, Секция геология. URL: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1170532>
36. Dirksen O.V., Bazanova L.I., Pletchov P.Yu., Portnyagin M.V., Bychkov K.A. Volcanic activity at Sedankinsky Dol lava field, Sredinny ridge during the Holocene (Kamchatka, Russia) // IV International Biennial Workshop on Subduction Processes Emphasizing the Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs Petropavlovsk-Kamchatsky, August 21-27, 2004, p.55
37. Трусов С.В., Плечов П.Ю. Физико-химические параметры магматической камеры под вулканом Кизимен (Камчатка). // Материалы IV международного совещания по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский, 2004, с.180-183
38. Pletchov P, Krashennnikov A., Seliverstov A., Trusov S, Ustiansky V. Electronic publishing for academics: geology and physics in Russian Network for Natural Sciences // in Proceedings of the 8th ICCS International Conference on electronic Publishing ,2004, pp.103-110
39. Плечов П.Ю., Серебряков Н.С. Реликты фергуситов в породах рисчорритового комплекса Хибинского массива // XXI Всероссийский семинар по геохимии магматических пород и школа "Щелочной магматизм Земли", Апатиты, 3 - 5 сентября 2003 года
40. Pletchov P., Trousov S., Varlamov D., Bychkov K. Prototype of the logical basis for geological data representation in Internet // XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Sapporo, Japan, June 30, 2003 - July 11, 2003, vol.B, p.524
41. Pletchov P.Yu., Tetroeva S.A., Puzankov M.Yu. Two-level of island arc mantle melting beneath Avacha volcano, Kamchatka, XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Sapporo, Japan, June 30, 2003 - July 11, 2003, vol. A., p. 345-247.
42. Белоусов И.А., Плечов П.Ю., Чурикова Т.В., Белоусов А.Б. Изучение расплавных включений во вкрапленниках оливина базальтов вулкана Чикурачки, Курильские острова.// Электронный научно-информационный журнал "Вестник Отделения наук о Земле РАН" №1(21), 2003, URL: http://geo.web.ru/conf/khitariada/1-2003/informbul-1_2003/magm-13.pdf
43. Бычков К.А., Плечов П.Ю., Арискин А.А. Оценка условий кристаллизации ареальных базальтов р-на г.Терпук (Срединный хребет, Камчатка).// Электронный научно-информационный журнал "Вестник Отделения наук о Земле РАН" №1(21), 2003, URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2003/informbul-1/magm-14.pdf
44. Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю. Происхождение и состав примитивных расплавов Ключевского вулкана, Камчатка - по данным изучения расплавных включений. // Электронный научно-информационный журнал "Вестник Отделения наук о Земле РАН" №1(21),2003. URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2003/informbul-1/magm-15.pdf
45. Плечов П.Ю., Портнягин М.В., Трусов С.В., Миронов Н.Л. Эффекты, искажающие состав расплавных включений // Электронный научно-информационный журнал "Вестник Отделения наук о Земле РАН" №1(21),2003, URL: http://geo.web.ru/conf/khitariada/1-2003/informbul-1_2003/magm-17.pdf

46. Mironov, N.; Portnyagin, M.; Pletchov, P. The origin and composition of primitive melts of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka - insight from melt inclusions study // Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 2003, 01966
47. Trusov, S.; Pletchov, P.; Ivanov, B. Kizimen volcano basaltic andesites: petrography and magmatic inclusions // Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 2003, 12988
48. Churikova, T.; Wörner, G.; Kronz, A.; Pletchov, P.; Mironov, N.; Portnyagin, M. S, Cl, F and Trace Elements in Melt Inclusions in Olivines from Mafic Kamchatka Rocks // Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 2003, 13291
49. Хубуная С. А., Соболев А. В., Портнягин М. В., Миронов, Н. Л., Плечов П. Ю. Петрология известково-щелочных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // В сб.: Современный вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы юбилейной сессии Камчатского научного центра ДВО РАН, посвященной 40-летию Института вулканологии 8 - 11 октября 2002 г. // Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2003, С.102-106.
50. Volynets, A.O., Pevzner, M.M., Pletchov P., Churikova T. Source variations in Kamchatka back-arc volcanism inferred from mineral and melt inclusion study in South Cherpouk monogenetic center. // AGU Fall Meeting, 2002.
51. Trousov S., Pletchov P., Ivanov B. Some petrological features of Kizimen volcano // In materials of "3rd Biennial Workshop on Subduction processes emphasizing the Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs", June 9-15, 2002
52. Churikova T., Worner G., Kronz A., Pletchov P., Mironov N., Portnyagin M. S, Cl, F and trace element composition of melt inclusions from Kamchatka olivines // In materials of "3rd Biennial Workshop on Subduction processes emphasizing the Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs", June 9-15, 2002
53. Volynets A., Pletchov P., Pevzner M. Mid-Holocene South Cherpuk Monogenetic Volcanic Center of Ichinskaya Zone (Sredinny Ridge, Kamchatka): some petrologic features of rocks and first data on the melt's composition // In materials of "3rd Biennial Workshop on Subduction processes emphasizing the Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs", June 9-15, 2002
54. Churikova T., Worner G., Kronz A., Pletchov P. S, Cl and F in olivine melt inclusions from mafic arc rocks in Kamchatka // EUG-XI. Strasbourg, 2001, 389.
55. Mironov N.L., Portnyagin M.V., Pletchov P.Yu. Physicochemical conditions of final stage of Klyuchevskoy volcano magma evolution: insight from melt inclusions in minerals of high alumina basalts // EUG-XI. Strasbourg, 2001, 442.
56. Pletchov P. Yu., Churikova T., Woerner G., Kronz A. Oxygen fugacity variations in arc magmas across the Kamchatka deduced from olivine-spinel equilibria // EUG-XI. Strasbourg, 2001, 429.
57. Portnyagin M.V., Pletchov P. Yu., Mironov N.L., Tetroeva S.A. Olivine-hosted melt inclusions in Kamchatka lavas: implications for the origin of high-Ca low-Si melt inclusions in island arc settings // EUG-XI. Strasbourg, 2001, 447.
58. Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю. Эволюция примитивных расплавов Ключевского вулкана по данным экспериментального изучения расплавных включений // Тезисы докладов XIV совещания по экспериментальной минералогии, 2001, с.267
59. Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю. Физико-химические условия кристаллизации и эволюция высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана по данным изучения расплавных включений в минералах. // Материалы 12-ой конференция молодых ученых памяти К.О.Кратца. С-Петербург, 2001, С. 83-85.

60. Тетроева С.А. и Плечов П.Ю. Физико-химические условия кристаллизации базальтов Авачинского вулкана по данным изучения расплавных включений в минералах. // *Материалы 12-ой конференция молодых ученых памяти К.О.Кратца. С-Петербург, 2001, С. 104-107.*
61. Mironov N.L. and Pletchov P.Yu. Experimental investigations of melt inclusions in phenocrysts from Klyuchevskoy volcano basalts, Kamchatka, Russia // *EMPG VIII (J.Conf.Abs.5), Bergamo, Italy, 2000, p. 344.*
62. Portnyagin, M. V., Plechov P.Yu., Osipenko A.B. Influence of natural decrification on the composition of melt inclusions in olivine: a study of melanocratic basalts from Avacha Volcano (Kamchatka). // *Herald DGGGMS RAS (№ 5 (15)), v.2, 2000, pp.54-56.*
63. Mironov N.L., Pletchov P.Yu., Portnyagin M.V. The relationship between high-magnesium and high-alumina basalts of the Klyuchevskoy volcano - insight from melt inclusions study // *Herald DGGGMS RAS (№ 5 (15)), v.2, 2000, pp.48-49.*
64. Trousov S. and Pletchov P. Techiques of the correction of melt inclusion compositions for boundary layer effects. VIII International Symposium on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry (EMPG VIII) (J.Conf.Abs.5), Bergamo, Italy, 2000, p. 487-489.
65. Миронов Н.Л. и Плечов П.Ю. Генетическая связь высокомагнезиальных и высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана по данным изучения магматических включений в минералах. // *Петрография на рубеже XXI века (итоги и перспективы), г. Сыктывкар, УрО РАН, 2000, С. 112-113.*
66. Плечов, П. и С. В. Трусов Влияние граничных эффектов на состав расплавных включений: эксперимент и моделирование // *Вестник ОГГГН РАН(№ 5 (15)), 2000, С.58-60.*
67. Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Осипенко А.Б. Влияние природной декрепитации на состав экспериментально гомогенизированных расплавных включений в оливине: на примере изучения меланократовых базальтов вулкана Авача (Камчатка) // *Тезисы ЕСЭМПГ, Москва, ГЕОХИ, 2000, <http://www.geokhi.ru/conference/НПТ2000/magma.html>*
68. Трусов С.В. и Плечов П.Ю. (2000). Экспериментальное изучение граничных эффектов на границе кристалл-расплав. Петрография на рубеже XXI века (итоги и перспективы), г. Сыктывкар, УрО РАН, 2000, С. 163-166.
69. Pletchov P., Tetroeva S., Mironov N.L. (1999). Petrology of Kambalny volcano (Kamchatka peninsula) by inclusions in minerals. // *Terra Nostra 6: 231-232.*
70. Миронов Н.Л., Плечов П.Ю. Эволюция высокоглиноземистых базальтов влк. Ключевской по данным изучения расплавных включений в минералах // *Проблемы магматической и метаморфической петрологии, Москва, МГГА, 1999, С.42-44.*
71. Плечов П.Ю., Тетроева С.А. и Миронов Н.Л. Петрология влк. Камбальный (Камчатка) по данным включений в минералах. // *Проблемы магматической и метаморфической петрологии, Москва, МГГА, 1999, С.64-66.*
72. Миронов Н.Л., Плечов П.Ю. Возникновение гибридных расплавов в ходе эволюции базальтов влк. Ключевской (поток Апахончич). Проблемы генезиса магматических и метаморфических пород, Санкт-Петербург, 1998, С 78-79.
73. Трусов С.В., Плечов П.Ю., Котельников А.Р. "Синтез щелочных полевых шпатов в системе SiO₂-NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈." Тезисы ЕСЭМПГ, Москва, ГЕОХИ, 1998, С.24.
74. Pletchov P.Yu., Kotel'nikov A.R.. Synthesis of artificial melt inclusions in the KAlSi₃O₈-NaAlSi₃O₈ system. // *Experiment in Geosciences 6(2), 1997, 48-51.*
75. Миронов Н.Л. и Плечов П.Ю. Особенности химического состава и образования расплавных включений в плагиоклазах потока Апахончич влк.

- Ключевской. // Проблемы магматической и метаморфической петрологии, МГГА, Москва, 1997, С.32-34.
76. Плечов П.Ю., Граменицкий Е.Н., Котельников А.Р. Искусственные расплавные включения в гаплогранитной системе // Проблемы магматической и метаморфической петрологии., Москва, 1997, С.68-70.