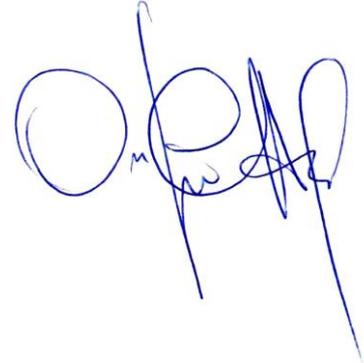


На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long vertical stroke extending downwards.

**Озеров Алексей Юрьевич**

**ДИНАМИКА ЭРУПТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ЭВОЛЮЦИЯ МАГМ И МОДЕЛИ  
БАЗАЛЬТОВЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА)**

Специальность:

25.00.04 – петрология, вулканология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Москва

2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН)

**Официальные  
оппоненты:**

**Курчавов Анатолий Михайлович**

доктор геолого-минералогических наук,  
Институт геологии рудных месторождений,  
петрографии, минералогии и геохимии Российской академии  
наук (ИГЕМ РАН), ведущий научный сотрудник;

**Спиридонов Эрнст Максович**

доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова, Геологический факультет;

**Чашечкин Юлий Дмитриевич**

доктор физико-математических наук, профессор,  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской  
академии наук (ИПМех РАН), заведующий Лабораторией  
механики жидкостей.

**Ведущая  
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Дальневосточный геологический институт Дальневосточного  
отделения Российской академии наук (ДВГИ ДВО РАН,  
г. Владивосток).

Защита состоится 27 мая 2016 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 диссертационной работой можно ознакомиться в читальном зале Отдела  
диссертаций Фундаментальной библиотеки Московского государственного  
университета имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., 27).

Автореферат разослан 26 апреля 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор геолого-минералогических наук



Н.Г. Зиновьева

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность проблемы.** Базальтовый вулканизм – один из главных геологических процессов, определяющих облик Земли. С ним связан широкий спектр проблем, включающих эволюцию магматического вещества в питающих системах, динамику эруптивного процесса и механизмы извержений различного типа.

По своим характеристикам базальтовые извержения значительно отличаются друг от друга. Интенсивность извержений находится в широком диапазоне – от слабых «безопасных» проявлений вулканической активности до мощнейших катастрофических извержений, способных изменить облик целого региона. Разные типы вулканической активности могут проявляться на разных этапах одного и того же извержения. Следующие друг за другом извержения одного вулкана могут отличаться по типу, например эффузивные, эксплозивные, эффузивно-эксплозивные, причем одни из них длятся часы или дни, другие продолжаются месяцы, годы, десятилетия.

Попытки систематизации извержений предпринимались еще в XVIII веке. С тех пор были описаны основные типы извержений, представлены общие классификационные признаки, однако разобраться в причинах разнообразия извержений, определить главные закономерности и понять природу вулканического процесса пока не удалось. Механизмы извержений вулканов в настоящее время относятся к малоизученной отрасли вулканологии.

При изучении базальтового вулканизма необходимо учитывать, что извержение – это многогранное явление, которое не может быть описано в рамках одной научной дисциплины. Следует принимать во внимание, что основные процессы, определяющие характер извержения, происходят в питающей магматической системе и скрыты от исследователя. Главной движущей силой извержения являются поднимающиеся магматические расплавы, а условия их выхода на поверхность, объемы, физическое состояние и распределение газовой фазы обуславливают параметры извержений. Чтобы составить представление о них, исследователям необходимо привлекать базовый фактический материал – вещественный состав магматических продуктов и динамические характеристики извержений. Анализ этих материалов позволяет выделить присущие магматической системе эруптивные закономерности, которые являются основой петрологического и экспериментального физического моделирования. Такой комплексный подход позволяет выявить главные процессы, определяющие характер базальтовых извержений, и определить причины их широкого разнообразия.

**Целью работы** является выявление особенностей базальтового вулканизма: эволюции магматических расплавов, периодичностей в динамике эруптивного процесса и механизмов разных типов извержений.

Соответственно поставлены следующие **задачи**:

1 – исследовать характер преобразований магматического вещества в питающей системе вулкана, установить взаимоотношения минеральных фаз и изменения их составов, создать схему минеральных парагенезисов пород Ключевского вулкана;

2 – создать петролого-геохимическую модель формирования известково-щелочной непрерывной высокомагнезиальной–высокоглиноземистой серии базальтоидов Ключевского вулкана;

3 – выявить периодичности в динамике эксплозивной активности Ключевского вулкана; изучить эти явления во временных интервалах от первых секунд до десятков часов;

4 – изучить периодические процессы в ходе извержений с использованием методов статистического анализа, применяемого к непрерывным рядам данных вулканического дрожания;

5 – выделить два новых типа базальтовых извержений – пульсирующее фонтанирование и периодическое фонтанирование;

6 – спроектировать и построить крупногабаритную лабораторную установку для моделирования динамики двухфазных смесей в вертикальных колоннах, провести экспериментальные исследования с целью сопоставления полученных данных с реальными вулканическими событиями;

7 – в ходе экспериментов выделить четыре новых газогидродинамических режима – пенных кластеров, блокированных кластеров, открытых кластеров и равномерный пенный режим;

8 – создать новую схему режимов течения двухфазных смесей в вертикальных колоннах;

9 – показать, что различные типы эксплозивной деятельности обусловлены конкретным типом газогидродинамического режима в жерле вулкана;

10 – установить механизмы трех типов базальтовых извержений – пульсирующего фонтанирования, стромболианских взрывов и периодического фонтанирования.

**В качестве главного объекта исследования** выбран Ключевской вулкан, один из активнейших вулканов мира. Это – вулкан-гигант, на его долю приходится почти половина ювенильного материала, поступающего на поверхность земли в Курило-Камчатской вулканической зоне. Породы вулкана представляют собой непрерывную высокомагнезиально–высокоглиноземистую базальт-андезибазальтовую серию (от 12 до 4 мас. % MgO). Постройка вулкана почти полностью состоит из высокоглиноземистых андезибазальтов, в резко подчиненном количестве представлены высокомагнезиальные, магнезиальные и глиноземистые базальтоиды. Совместное нахождение этих типов вулканитов дает уникальную возможность выявить характер их взаимодействия и создать модель формирования обсуждаемой магматической серии.

Извержения Ключевского вулкана происходят практически ежегодно. Для него характерны все разновидности базальтовых извержений: по типу – эффузивные, эффузивно-эксплозивные, эксплозивные; по месту выхода магм – вершинные и побочные; по степени интенсивности – от слабых до пароксизмальных. Высокая активность вулкана и разнообразие его деятельности создают благоприятные возможности для выявления закономерностей в динамике извержений.

Таким образом, Ключевской вулкан – самый удобный объект в пределах Тихоокеанского огненного кольца для исследования эволюционных преобразований базальт-андезибазальтовых серий пород, изучения динамических характеристик извержений и создания моделей эруптивных процессов.

Представленные в диссертационной работе исследования динамических характеристик извержений и результаты моделирования процессов в питающих системах относятся к жидким магматическим расплавам, имеющим базальтовый и андезибазальтовый состав. Для краткости изложения, далее, там, где возможно, мы будем пользоваться такими терминами, как “базальтовый расплав”, “базальтовый тип извержения”, “базальтовый вулкан”.

Для основных периодов, выделенных по сейсмологическим или другим данным в ходе извержений одного или разных типов, в дальнейшем будем использовать термин “периодичности”.

Необходимо сделать пояснения о различиях механизмов базальтовых и андезитовых извержений. Кроме базальтовых типов извержений, нами проводились исследования извержений андезитовых вулканов – Шивелуч, Безымянный, Карымский и Авачинский [Озеров и др., 1996; Озеров, 1997; Озеров, Демянчук, 2004]. Анализ полученных данных позволил автору прийти к заключению о принципиальном отличии механизмов базальтового и андезитового типа извержений:

– дискретный (периодический) механизм базальтовых типов извержений – обусловлен газогидродинамическими преобразованиями жидких расплавов, в которых газовые пузырьки поднимаются быстрее заключающего их расплава. В результате происходит разделение поступающего расплава на слои пены и на слои жидкости с существенно меньшим количеством пузырьков. Закономерное чередование этих слоев при определенных расходах магмы создает периодичность в характере поступления раскаленного материала на поверхность [Озеров, 2004];

– дискретный (периодический) механизм андезитовых типов извержений – обусловлен особенностями поступательного движения вязко-упругого магматического расплава вдоль стенок выводного канала. Газовые пузырьки запечатаны в вязком расплаве, они не могут образовывать собственные структуры. Дискретность в характере извержения возникает в процессе повторяющихся друг за другом циклов – накопления энергии в нижней части магматической колонны (под пробкой) и последующей разрядки в виде выброса [Озеров, Ispolatov, Lees, 2003; Озеров, 2004].

Извержения андезитового типа и их механизмы в настоящей работе не рассматриваются, диссертация посвящена исследованию природы базальтовых извержений.

**Фактический материал**, положенный в основу работы, собирался на протяжении трех десятилетий. Автор в качестве начальника вулканологического отряда Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН изучал извержения Ключевского вулкана – побочные 1983, 1988 гг. и вершинные 1984, 1985, 1987, 1988, 1993, 1994, 2008 гг. Было проведено детальное опробование лавовых потоков и шлаковых конусов древних и современных (начиная с 1932 г.) побочных прорывов вулкана. Получены петрохимические и геохимические данные составов этих пород. Проведено исследование породообразующих минералов прорывов Юбилейный, Пийпа и Былинкиной. В андезибазальтах прорыва Юбилейный изучены кристаллические включения в минерале-хозяине ОI, Срх и РI. Исследованы сейсмологические материалы, полученные во время извержений 1978, 1983, 1984, 1993, 1994, 2007 и 2008 гг. По литературным источникам проанализирована эруптивная деятельность Ключевского вулкана за 60 последних лет. На созданной автором экспериментальной установке моделирования движения двухфазных смесей в протяженных вертикальных колоннах получен фактический материал о нуклеации газовых пузырьков, их росте, коалесценции, образовании, преобразовании газовых структур и динамических характеристиках двухфазных потоков.

#### **Основные методы исследования.**

Петрологические – петрохимическое и геохимическое изучение базальтоидов, микронзондовое исследование породообразующих минералов и твердофазных включений, термодинамическое ЭВМ-моделирование. Вулканологические – изучение динамических параметров извержений с использованием визуальных методов, фото- и видеосъемки. Сейсмологические – оцифровка сейсмических лент, построение графиков временных вариаций огибающей амплитуды вулканического дрожания и обработка их методами математической статистики. Инженерное конструирование – создание крупногабаритной установки экспериментального исследования динамики двухфазных смесей в вертикальных колоннах. Физическое

моделирование – выделение новых режимов течения двухфазных смесей, изучение механизмов формирования газогидродинамических кластерных структур. Синтез результатов исследования – обобщение полученных результатов. Создание на их основе моделей, описывающих процессы эволюции магм, их подъема в питающем канале и выхода на поверхность во время извержений.

#### **Методика исследований.**

1. Геолого-геофизические методы исследований вулканических извержений включают: отбор образцов лавы и пирокластики в хронологической последовательности их выхода на поверхность; визуальную, фото- и видеорегистрацию эруптивных явлений (взрывы и фонтанирование в кратере, лавовые потоки, пепловые шлейфы). Опробование побочных прорывов Ключевского вулкана. Получение непрерывных рядов сейсмических данных (вулканическое дрожание) во время проявления периодических закономерностей в динамике извержений вулкана.

2. Петрохимические, геохимические и минералогические методы исследований – анализ валового химического состава пород на основные породообразующие оксиды и на примесные элементы. На рентгеноспектральном микроанализаторе изучение породообразующих ОI, Сrx, PИ и аксессуарных Орх, Sp, Mgt минералов, а также исследования кристаллических (твердофазных) включений в минерале-хозяине ОI, Сrx и PИ.

3. Экспериментальные методы исследований – выявление и изучение новых режимов течения газожидкостных двухфазных смесей, вызывающих при выходе магмы на поверхность различные типы извержений. Для проведения экспериментальных исследований авторами проекта сконструирован и изготовлен Комплекс Аппаратуры Моделирования Базальтовых Извержений (КАМБИ).

4. Анализ и обобщение полученных данных. Статистические методы анализа гистограмм составов минералов и графиков химических составов пород. ЭВМ-моделирование петрохимических и геохимических трендов при изобарном и декомпрессионном фракционировании исходных магм Ключевского вулкана с использованием для расчетов программы КОМАГМАТ. Математические методы выявления периодичностей в записях вулканического дрожания. Метод сравнительного подбора сейсмологических графиков, построенных на основе сейсмограмм, и акустических графиков, полученных в процессе экспериментов. Метод группирования вулканических событий по продолжительности и эруптивным характеристикам.

#### **Новые методики исследований, разработанные автором.**

В сейсмологии разработана методика «эквидистантного поинтервального отсчета» для анализа записей вулканического дрожания [*Ozerov, Konov, 1987; Конов, Озеров, 1988*] с целью выявления и изучения устойчивых периодичностей в динамике извержений.

В экспериментальном моделировании разработана методика «газогидродинамического моделирования базальтовых извержений», позволяющая изучать эволюцию двухфазного потока в протяженных вертикальных колоннах [*Озеров, 2007, 2010, 2011*].

#### **Конструирование новой экспериментальной аппаратуры.**

Для исследования природы новых, установленных нами, типов извержений – пульсирующего фонтанирования и периодического фонтанирования, создан газогидродинамический Комплекс Аппаратуры Моделирования Базальтовых Извержений – КАМБИ [*Озеров, 2007, 2010, 2011*]. Задача опытов на КАМБИ – экспериментальное моделирование процессов, происходящих в питающих системах базальтовых вулканов. Цель – определение механизмов пульсирующего

фонтанирования, стромболианских взрывов и периодического фонтанирования. При конструировании были учтены геометрические параметры реальных питающих каналов базальтовых вулканов: соотношение внутреннего диаметра канала к его высоте ~ 1:1 000. КАМБИ имеет высоту 18 метров, состоит из моделирующей и регистрирующей систем. Моделирующая система включает емкость для приготовления газонасыщенной модельной жидкости (магматический очаг), прозрачный шланг (питающий канал), аквариум для приема поступающей модельной жидкости (кратер). Регистрирующая система включает систему динамического видеослежения, электронный высотомер и спидометр, блок видеорегистрации, блок акустической регистрации, синхронизирующее устройство и отключающую систему. Установка не имеет аналогов в мире.

### **Основные защищаемые положения.**

**1. Установлено, что непрерывная серия пород Ключевского вулкана (MgO 12,31–4,10 мас.%) сформировалась из исходных высокомагнезиальных базальтов в результате декомпрессионного фракционирования (O1, Crx) и смешения родственных расплавов в магмоводе. В его верхней части формируются высокоглиноземистые андезибазальты. Разнообразие пород серии определяется глубиной, на которой от основного магмовода отделяется расплав, транспортируемый дайками на склоны вулкана. Присутствие ранней мантийной минеральной ассоциации во всех типах пород обеспечивается за счет автосмещения более глубоких магнезиальных порций расплава с вышерасположенными более глиноземистыми. Химическое разнообразие пород – результат декомпрессионного фракционирования темноцветных минералов, происходящего преимущественно между извержениями во время остановок движения магмы.**

**2. Выявлено новое свойство базальтового-андезибазальтового вулканизма – устойчивые периодичности в динамике извержений, проявляющиеся в широком временном диапазоне (секунды–сутки).** В основе выделения периодичностей – обобщение результатов 80-летнего мониторинга извержений Ключевского вулкана (литературные данные, исследование динамики извержений, результаты изучения огибающей амплитуды вулканического дрожания) и анализ строения шлаковых конусов. Установлено три основные группы периодичностей: пульсирующее фонтанирование – 0,66–5 с; стромболианские взрывы – 20 с – 20 мин и периодическое фонтанирование – 1,5–8 ч. Пульсирующее фонтанирование и периодическое фонтанирование, впервые выделенные на Ключевском вулкане типы базальтовых извержений, в последующем установлены на других вулканах мира (Килауза, Толбачик, Этна и др.). Открытые периодичности могут служить эталонами для сравнения с результатами моделирования вулканических процессов.

**3. Предложен новый метод физического моделирования вулканических процессов, основанный на исследовании газогидродинамических потоков в протяженных прозрачных вертикальных колоннах, с помощью специально сконструированной крупногабаритной экспериментальной установки – лабораторного аналога действующего базальтового вулкана.** Эксперименты проводятся в газонасыщенном и барботажном вариантах. Параметры моделирования контролируются системой динамического видеослежения и акустической аппаратурой. Разработана новая схема режимов течения двухфазных потоков, состоящая из 11 типов – от жидкостного до газового, в том числе четырех впервые установленных в эксперименте – пенного, пенных кластеров, заблокированных кластеров и открытых кластеров. Представленная типизация

газогидродинамических режимов позволяет объяснить многообразие типов базальтовых извержений.

**4. Установлены механизмы периодических и монотонных типов извержений жидких базальтовых-андезибазальтовых магм** на основе анализа данных извержений Ключевского вулкана и результатов экспериментального моделирования движения газожидкостных смесей в протяженных вертикальных колоннах. Пульсирующее фонтанирование обусловлено возникновением в магматическом потоке пенных кластеров; стромболианские взрывы определяются выходом на поверхность заблокированных кластеров или образующихся из них газовых снарядов; периодическое фонтанирование связано с реализацией в кратере режима открытых пузырьковых кластеров. Монотонные извержения формируются равномерными газогидродинамическими режимами – жидкостным, пузырьковым, смешанным, пенным или газовым. Показано, что характер каждого типа извержения коррелирует с конкретным газогидродинамическим режимом в подводящем канале. Систематизация механизмов разных типов извержений позволяет объяснить природу и разнообразие базальтового вулканизма.

#### **Научная новизна работы.**

1. Установлено направление эволюции известково-щелочных магм Ключевского вулкана – от высокомагнезиальных к высокоглиноземистым. Выявлен порядок кристаллизации высокоглиноземистых андезибазальтов, позволяющий проследить полную историю эволюции расплава. Создана петролого-геохимическая модель формирования пород Ключевского вулкана.

2. Впервые с достаточной полнотой исследованы периодичности, возникающие в ходе извержений Ключевского вулкана. Показано, что они проявляются на секундных, минутных и часовых временных интервалах.

3. Впервые в динамике извержений базальтовых и андезибазальтовых вулканов установлены новые типы вулканической деятельности – пульсирующее фонтанирование и периодическое фонтанирование.

4. В результате экспериментальных работ на КАМБИ установлены четыре новых газогидродинамических режима в вертикальных колоннах: пенный, пенных кластеров, заблокированных кластеров и открытых кластеров. Создана новая схема режимов течения двухфазных смесей в вертикальных колоннах.

5. Показано, что различные типы эксплозивной деятельности обусловлены типом газогидродинамического режима, проявляющимся в жерле вулкана.

6. Определены механизмы трех типов базальтовых извержений – пульсирующего фонтанирования, стромболианских взрывов и периодического фонтанирования.

#### **Практическое значение работы.**

1. Петролого-геохимические данные в совокупности с результатами изучения термодинамических условий формирования высокоглиноземистых андезибазальтов используются для разработки модели островодужной геодинамической обстановки.

2. Сопоставление данных по вулканическому дрожанию с результатами исследования разномасштабных эруптивных процессов наглядно демонстрирует, что вариации уровня вулканического дрожания хорошо коррелируют с изменениями эксплозивной активности Ключевского вулкана. Показана эффективность использования вулканического дрожания для слежения за деятельностью базальтовых вулканов. Установлено, что для базальтовых вулканов характерны процессы периодической концентрации энергии извержений, приводящие к экстремальным проявлениям вулканической деятельности. Выделенные основные

периодичности являются важными составляющими в комплексе методов по определению характеристик развивающихся вулканических извержений.

3. Ранее было известно два базальтовых типа извержений – гавайский и стромболианский [Луцицкий, 1971; Влодавец, 1984]. В настоящей работе выделены еще два типа базальтовых извержений – пульсирующее фонтанирование и периодическое фонтанирование. Это значительно расширяет представления об эруптивной деятельности, дает возможность создать принципиально новые технологии научного прогноза и позволяет системно исследовать извержения, являющиеся источником значительной опасности для жизнедеятельности человека.

4. Результаты экспериментального изучения механизмов базальтовых извержений, станут важной составляющей вулканологического мониторинга, существенно его расширят и наполнят новым содержанием. Это позволит на современном, качественно новом уровне моделировать сценарии грядущих вулканических событий и даст возможность определять оптимальную стратегию действий в конкретных чрезвычайных ситуациях. Такой подход позволит минимизировать воздействия сильных и катастрофических извержений на среду обитания человека, маршруты авиатранспорта и производственную деятельность. В регионах, подверженных прямому воздействию извержений вулканов на нашей Планете, живут сотни миллионов человек. Извержение вулкана Эйяфьятлакутль (Исландия) в 2010 г., например, наглядно показало, что даже небольшие по интенсивности извержения могут оказывать значительное влияние на жизнедеятельность населения всей Земли [Озеров, Гордеев, 2011].

5. Четыре новых газогидродинамических режима существенно расширяют представления о свойствах вертикальных газожидкостных потоков. Это позволит внести весомый вклад в теорию многофазной гидромеханики, применяемую для оптимизации работы нефтяных и геотермальных скважин.

**Апробация работы.** Материалы диссертации были представлены в качестве докладов на российских и международных конгрессах и конференциях: VI Всесоюзное вулканологическое совещание (Петропавловск-Камчатский, 1985); Вторая международная молодежная школа по геологии (София, Болгария, 1987); Международный симпозиум по геодинамике глубоководных желобов (Южно-Сахалинск, 1987); Международный вулканологический конгресс (Кагошима, Япония, 1988); Сессия Всесоюзного минералогического общества (Петропавловск-Камчатский, 1989); III Международная геохимико-геофизическая школа (Москва, 1991), 29-й Международный геологический конгресс (Киото, Япония, 1992); Семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (Москва, ГЕОХИ, 1993); Конгресс американского геофизического объединения, AGU (Балтимор, США, 1997); Конгресс американского геофизического объединения, AGU (Сан-Франциско, США, 1999); Юбилейная сессия Камчатского научного центра ДВО РАН, посвященная 40-летию Института вулканологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский, 2002); XXIII генеральная ассамблея Международного объединения геодезии и геофизики, IUGG (Саппоро, Япония, 2003); Международный геологический конгресс, IGC (Флоренция, Италия, 2004); 3-й Международный симпозиум по вулканологии (остров Джи-Джу, Корея, 2005); Первый международный симпозиум «Проблемы эксплозивного вулканизма» (Петропавловск-Камчатский, 2006); Конференция, посвященная Дню вулканолога (Петропавловск-Камчатский, 2007, 2008, 2013); Генеральная ассамблея по вулканологии и геохимии недр Земли, IAVCEI (Рейкьявик, Исландия, 2008); IV Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии «Вулканизм и геодинамика» (Петропавловск-Камчатский, 2009), 6-й Международный симпозиум по многофазным потокам, тепломассопереносу и преобразованию энергии, ISMF (г. Сиань, Китай, 2009); 15-ая Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях: физика геосфер», г. Москва, Физический факультет МГУ,

2009 г.; 7-ое Международное совещание по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, JKASP (Петропавловск-Камчатский, 2011); 11-ое Полевое совещание Комиссии по химии вулканических газов – CCVG, при Международной ассоциации вулканологии и химии земных недр, IAVCEI (Камчатка, 2011).

Основные положения диссертации были представлены в виде доклада на Объединенном заседании кафедры петрологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и секции Московского общества испытателей природы «Петрография» (декабрь 2012 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 118 работ, из них 30 статей в журналах, рекомендованных ВАК, и 4-е крупных раздела в коллективных монографиях.

Во всех работах, опубликованных в соавторстве, автор принимал непосредственное участие в разработке методик, сборе полевого материала, выполнении расчетов и аналитических исследований, в подготовке текстов и их доработке после рецензирования.

**Благодарности.** В диссертации представлены материалы, полученные автором на протяжении трех десятилетий, все это время весомая поддержка оказывалась исследователями разных специальностей. Автор благодарен всем коллегам за доброе содействие, без их ценного участия этот труд вряд ли удалось бы довести до завершения.

Многолетнюю значительную помощь работам оказывала дирекция Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН: академик РАН Е.И. Гордеев, академик РАН С.А. Федотов, С.Б. Самойленко, Г.А. Карпов, А.А. Овсянников, Я.Д. Муравьев, В.Л. Леонов, директор Камчатского филиала Геофизической службы РАН В.Н. Чебров, а также И.Р. Абубакиров, Г.П. Авдейко, М.А. Алидибиров, В.В. Ананьев, Л.П. Аникин, Г.И. Аносов, Г.И. Арсанова, Ю.А. Бабушкин, Е.С. Барский, В.И. Белоусов, Г.Е. Богоявленская, О.Е. Боград, Ю.С. Бородаев, А. Борсук, А.Ю. Бычков, К.А. Бычков, И.Г. Будько, А.В. Буткач, Г.Ф. Васильев, А.В. Викулин, Т.Д. Вислова, К.А. Власов, Г.В. Волгина, М.Г. Гавриленко, П.Г. Гавриленко, А.А. Гаврилов, В.А. Гаврилов, В.Т. Гарбузова, О.А. Гирина, Б.Н. Гордейчик, В.И. Горельчик, А.А. Гусев, В.И. Гусева, О.В. Гусева, Н.С. Данилевич, И.Е. Далетская, Л.В. Данюшевский, В.Н. Двигало, Д.В. Дементьев, М.В. Демянчук, Ю.М. Джалилов, О.И. Дьячкова, А.А. Долгая, Д.В. Дроздин, С.Я. Дроздина, В.Н. Дубровский, И.К. Дубровская, Р.Л. Дунин-Барковский, В.И. Дядин, О.А. Евдокимова, Ю.О. Егоров, В.А. Ермаков, Н.А. Жаринов, М.Е. Зеленский, Б.В. Иванов, В.В. Иванов (ст.), В.В. Иванов (мл.), Я.О. Исполатов, В.С. Каменецкий, Л.В. Карасик, С.В. Касьянов, А.С. Кириленко, В.А. Кириченко, Т.П. Кирсанова, А.В. Кирюхин, Г.В. Коваль, А.И. Козырев, А.А. Кондратов, А.С. Конов, А.В. Колосков, Ю.А. Кугаенко, Ю.Д. Кузьмин, Д.Ю. Кузьмин, В.М. Ладыгин, А.В. Ландер, С.Ф. Лактионов, С.М. Лимарева, И.В. Логинов, А.П. Максимов, Ю.Ф. Манухин, Е.К. Мархинин, Д.В. Мельников, И.В. Мелекесцев, И.А. Меняйлов, Н.Л. Миронов, Н.Н. Мозгова, Ю.Ф. Мороз, А.А. Мулькеев, С.И. Набоко, А.Ю. Озеров (ст.), Н.А. Озерова (мл.), А.М. Округина, В.М. Округин, Л.Г. Осипенко, В.К. Панов, С.И. Плотников, В.А. Подтабачный, Г.П. Пономарев, Э.Г. Пономарев, Т.В. Радюшина, В.А. Рашидов, А.Н. Рогозин, Н.В. Романов, С.Н. Рычагов, В.А. Салтыков, И.Ю. Свирид, О.Б. Селянгин, С.Л. Сенюков, В.А. Сергеев, В.В. Сергеев, Е.Г. Сидоров, А.Г. Симакин, Н.П. Смелов, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич, А.В. Сокоренко, А.М. Солдатова, А.В. Соловьев, В.В. Степанов, А.В. Сторчеус, В.М. Сугробов, Ю.А. Таран, И.Ф. Тимофеева, Л.А. Ушакова, П.П. Фирстов, С.А. Хубуная, В.Н. Шапарь, В.И. Шевцов

В.А. Широков, А.Г. Шкарупо, В.П. Шпак, Г.С. Штейнберг, В.С. Шульга, А.И. Фарберов, О.В. Федористов, Н.И. Филатова, Т.М. Философова, П.П. Фирстов, Г.Б. Флеров, Ю.В. Фролова, И.В. Чаплыгин, О.В. Чаплыгин, Д.В. Чебров, А.С. Чикичева, А.М. Чирков, С.А. Чирков, В.М. Чубаров, О.С. Чубарова, Т.Г. Чурикова, М.И. Угрин.

Особую благодарность автор выражает за обучение работам на извержениях, которое удалось пройти под руководством опытных вулканологов – В.Н. Андреева, Ю.М. Дубика, В.И. Иванченко, И.Т. Кирсанова, А.П. Хренова. Всплохи извержений глубоко вошли в сознание и являются путеводными маяками при выборе направлений исследования.

Около 30 лет автору посчастливилось проводить совместные исследования динамики извержений с начальником Камчаткой вулканологической станции им. Левинсон-Лессинга Ю.В. Демянчуком и вулканологическим дуэтом А.Б. Белоусовым и М.Г. Белоусовой.

Автор признателен проф. А.А. Арискину, Г.С. Барминой, Р.Р. Альмееву, с которыми проводил увлекательные исследования пород Ключевской группы вулканов. Курс лекций по Генетической петрологии А.А. Арискина, прослушанный автором на Геологическом факультете МГУ, был полезен для осмысления материалов по вещественному составу Ключевского вулкана.

Благодарен геофизику А.С. Конову. Во время совместного изучения периодичностей вулканического процесса для автора отрылась гармония сейсмического сигнала. В последующем при изучении извержений автор стремился получать и использовать сейсмологические материалы.

При конструировании установки физического моделирования КАМБИ и проведение экспериментальных исследований ценную поддержку оказывал теплофизик В.А. Дроздин.

Признателен проф. Ю.Д. Чашечкину, постоянно поддерживающему газогидродинамическое направление представленных исследований. Курс лекций Юлия Дмитриевича по гидродинамике, прослушанный автором на Физическом факультете МГУ, был важен для моделирования механики вертикальных газожидкостных систем.

В процессе осмысления материалов большую помощь оказали академик РАН В.В. Адушкин, академик РАН В.И. Коваленко, академик РАН Л.Н. Когарко, академик РАН В.А. Коротеев, д.г.-м.н. Ю.А. Мартынов, чл.-корр. РАН О.Э. Мельник, проф. М.А. Мохов, проф. П.Ю. Плечов, проф. Э.М. Спиридонов, проф. Н.Н. Сысоев, проф. Т.И. Фролова и доцент Ю.В. Фролова.

В процессе выполнения работ автор ощущал важную поддержку Администрации Дальневосточного отделения РАН: академика РАН В.И. Сергиенко, академика РАН А.И. Ханчука, чл.-корр. РАН М.А. Гузева, чл.-корр. РАН Б.В. Левина и начальника управления научных исследований А.С. Руднева. Гранты научного фонда ДВО существенно помогли реализации запланированных работ.

Проведение исследований в значительной мере было стимулировано инициативными грантам РФФИ. Автор благодарен за многолетнее содействие руководителю Отдела наук о Земле РФФИ д.ф.-м.н. В.В. Жмуру и сотруднице этого отдела Н.А. Михайловой.

Большое содействие при выполнении работ оказала администрация Камчатского края: заместитель Председателя Правительства В.Н. Карпенко, А.А. Гаврилов, Л.А. Грачев и С.И. Кравец.

Автор признателен иностранным коллегам John Eichelberger, Nelia W. Dunbar, Pavel E. Izbekov, Keith R. Joels, Luda, Alena, Lenia, Dima Kogan's, Jahn P. Lockwood, Vadim Levin, Tom P. Miller, Jaroslav O. Ispolatov, Richard Esser.

Благодарен Philip R. Kyle за приглашение и предоставленную возможность работать на извержении вулкана Эребус (Антарктида). В New Mexico Institute of Mining and Technology (Socorro, USA) автор прослушал курс лекций Philip Kyle по Вулканологии, сопровождаемый полевым изучением палеовулканологических объектов и научным обсуждением во время знаменитых вулканологических ланчей. Накапливались новые знания, приобретался опыт американской вулканологической Школы.

Важный этап научного пути был пройден с вулканологом Jonathan M. Lees во время трехлетнего Российско-Американского проекта NSF - "EAR 96-14639" «Side edge of Kamchatka Slab» (руководители Jonathan Lees и Озеров А.Ю.). В ходе извержений вулканов были получены сейсмические и акустические записи высокого разрешения, что открывало возможности интерпретации их генезиса, возникла потребность воспроизведения структуры сигналов в лабораторных установках. Это определило необходимость создания экспериментальной аппаратуры для моделирования динамики извержений.

Принципиальным для наших исследований было участие в Вулканологической школе в Nicolosi (Italy) и полевые экскурсии на вулкане Этна. Удалось провести сопоставление и найти общие черты в извержениях Камчатских и Итальянских вулканов. С глубокой благодарностью автор вспоминает Salvatore Alparone, Daniele Andronico, Ornella Cocina, Rosa Anna Corsaro, Carmelo Ferlito, Marco Viccaro.

Большое содействие в процессе подготовки рукописи оказали И.А. Абубакиров, В.Н. Васильев, В.И. Дядин, В.А. Максименко, А.П. Максимов, И.Л. Ототюк, Д.В. Чебров.

Автор искренне признателен за воспитание, помощь в выборе профессии, постоянную духовную и научную поддержку моему учителю – академику РАН, д.г.-м.н. Нине Александровне Озеровой.

**Финансовая поддержка** экспедиционных, лабораторных и экспериментальных исследований осуществлялась благодаря инициативным грантам РФФИ и ДВО, выполненным под руководством автора диссертации (РФФИ – 97-05-64541, 00-05-64466, 03-05-64881, 06-05-64590, 09-05-00841, 15-05-05502; ДВО – 06-III-A-08-331, 12-III-A-08-173, 15-I-2-069), по Государственному контракту Программы № 4 и № 16 фундаментальных исследований Президиума РАН, грантом Правительства Камчатского края, по международным проектам NSF EAR-961463 (1997–1999 гг.) и NSF «Partnerships in International Research and Education, PIRE (2006–2010 гг.).

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 428 страниц текста, включающих 101 рисунок, 15 таблиц, список литературы, состоящий из 437 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов, и 10 приложений.

Во введении обсуждается актуальность и новизна работы, приводятся общие сведения о Ключевском вулкане. В Главе 1 рассматриваются вопросы формирования магматической серии пород Ключевского вулкана. В Главе 2 представлены материалы по изучению периодичностей в динамике извержений, возникающих при поступлении на поверхность магматических расплавов. В Главе 3 излагаются принципы конструирования экспериментальной установки, необходимой для моделирования периодичностей, установленных в процессе извержений. В Главе 4 исследованы механизмы формирования трех основных групп эруптивных периодичностей, проявленных на вулкане. Заключение содержит результаты исследования и итоговые выводы.

# Глава 1.

## ФОРМИРОВАНИЕ МАГМАТИЧЕСКОЙ СЕРИИ ПОРОД КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА

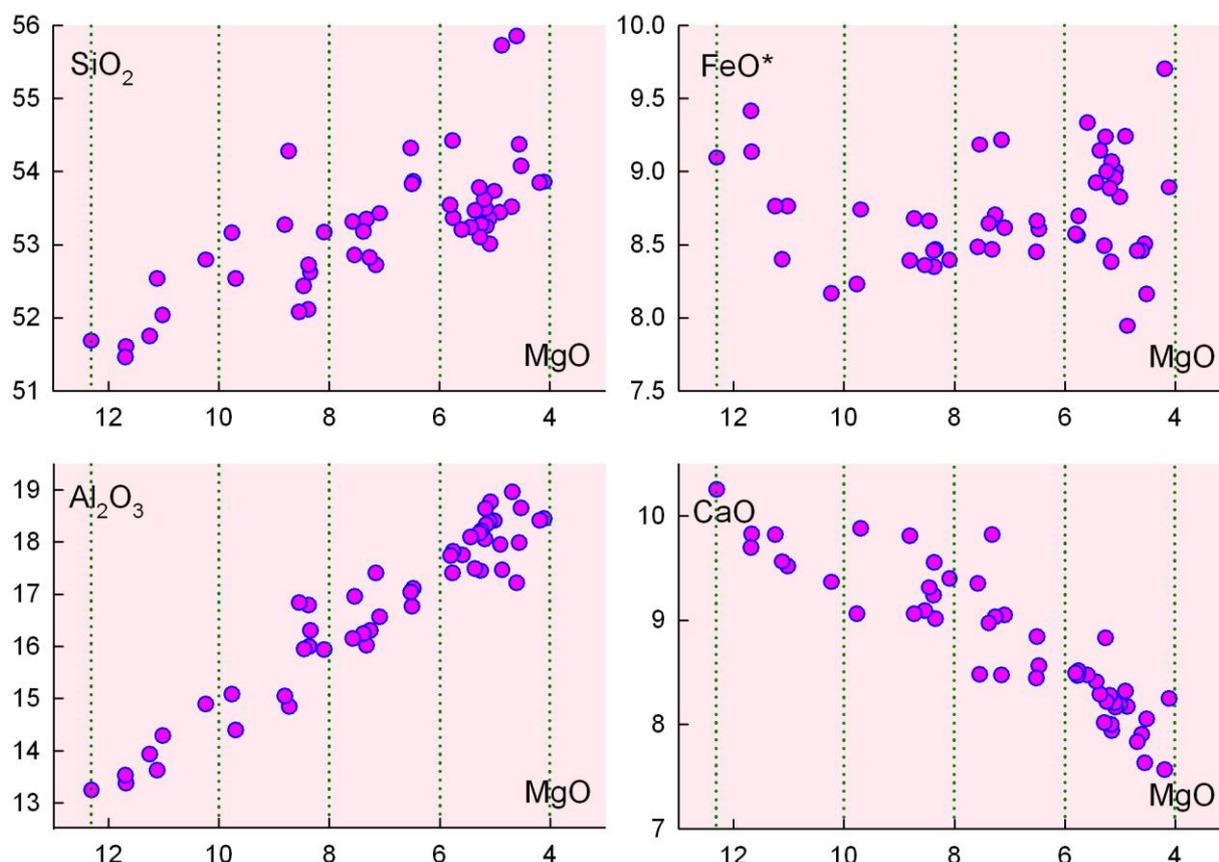
Цель исследований – определить характер преобразований магматического вещества в питающей системе вулкана, установить взаимоотношения минеральных фаз и изменения их составов, разработать схему минеральных парагенезисов пород Ключевского вулкана. Создать петролого-геохимическую модель формирования непрерывной высокомагнезиальной–высокоглиноземистой базальт-андезибазальтовой серии пород Ключевского вулкана.

Методы исследований – петрохимические и геохимические для пород вулкана, микронзондовые для породообразующих, акцессорных минералов и твердофазных включений (силикатных и рудных) в минерале-хозяине, численное моделирование (программа КОМАГМАТ) условий формирования пород вулкана.

Природный объект исследования – непрерывный петрохимический ряд пород Ключевского вулкана (высокомагнезиальные базальты–высокоглиноземистые андезибазальты); породообразующие, акцессорные минералы и твердофазные кристаллические микровключения в минерале-хозяине.

### Петрохимические особенности серии пород Ключевского вулкана

Магматическая ассоциация пород Ключевского вулкана является непрерывной базальт-андезибазальтовой серией, которая относится к известково-щелочному типу (**рис. 1-01**). Все составы породы находятся в поле нормальной щелочности, средней калиевости, средней железистости и представляют собой полный набор



**Рис. 1-01.** Вариационные диаграммы химических составов (мас. %) базальт-андезибазальтовой серии пород Ключевского вулкана.

базальтоидов, включающий высокомагнезиальные базальты, магнезиальные, глиноземистые и высокоглиноземистые андезибазальты. Вулкан сложен в основном высокоглиноземистыми андезибазальтами (на 99 %). Совместное нахождение перечисленных типов вулканитов позволяет установить их взаимоотношение и создать модель формирования полной базальт-андезибазальтовой серии пород (от 12 до 4 % MgO).

Гипотезы образования высокомагнезиальной–высокоглиноземистой серии до сих пор остаются дискуссионными. Для выяснения механизма образования нами проведен цикл исследований.

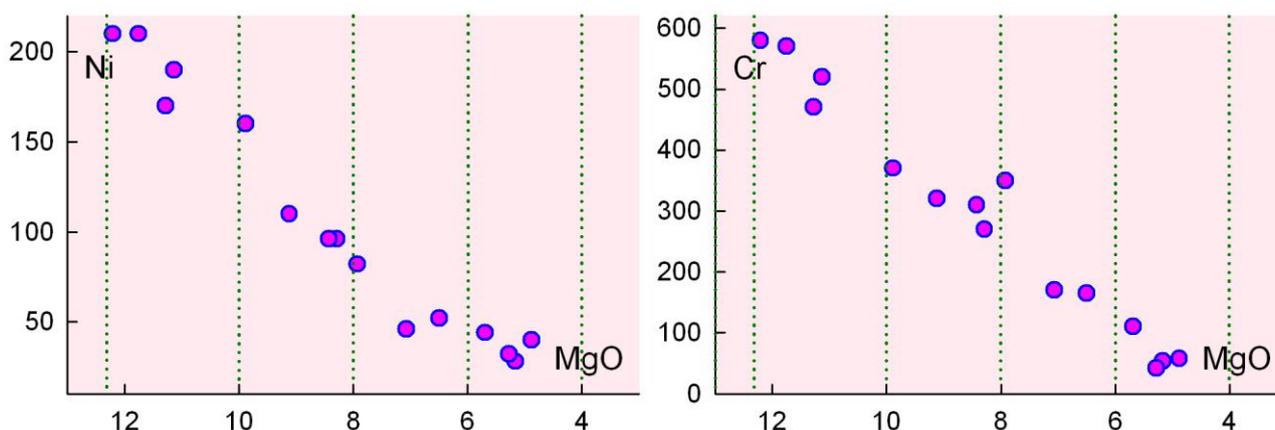
При проведении работ использовалась четырехчленная петрохимическая классификация пород вулкана (табл. 1.01).

**Таблица 1.01.** Петрохимические подтипы пород Ключевского вулкана

Подтипы пород	Аббревиат.	MgO, мас. %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , мас. %
Высокоглиноземистые андезибазальты	(ВГ-АБ)	4,00 – 6,00	17,00 – 19,00
Глиноземистые андезибазальты	(Г-АБ)	6,00 – 8,00	16,00 – 17,00
Магнезиальные андезибазальты	(М-АБ)	8,00 – 10,00	15,00 – 16,00
Высокомагнезиальные базальты	(ВМ-Б)	10,00 – 12,31	13,30 – 15,00

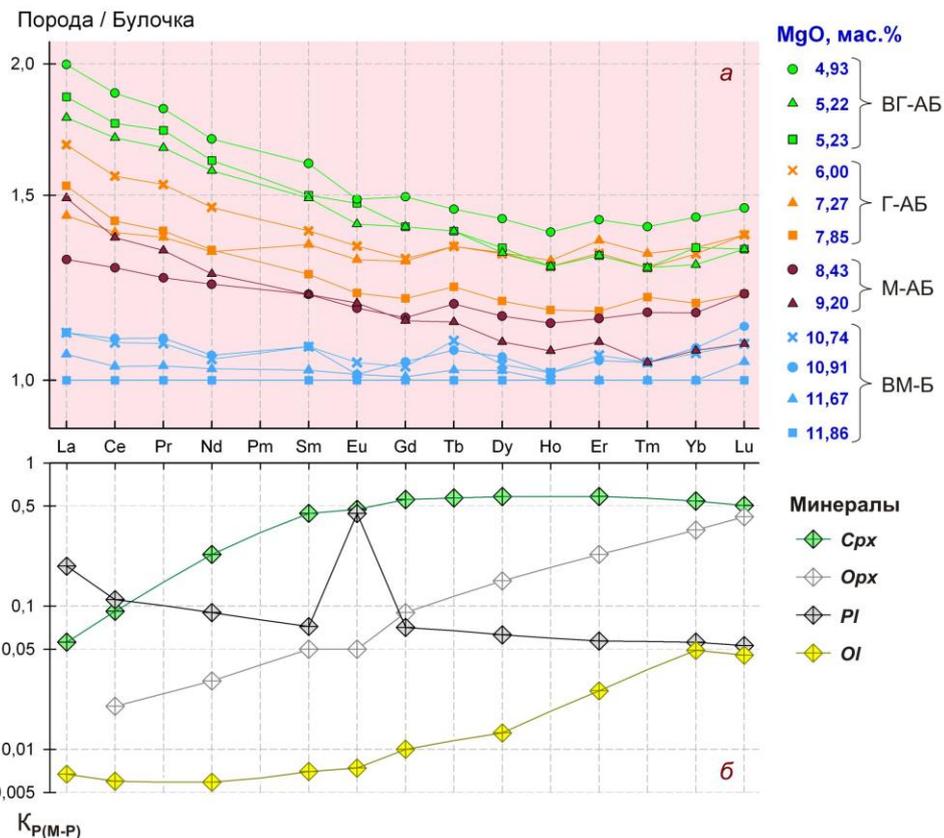
#### Вариации содержания микроэлементов

Анализ содержаний примесных элементов в породах вулкана установил четкую корреляцию концентрации микроэлементов и содержания MgO (рис. 1-02). Высокие содержания хрома и никеля в ВМ-Б позволяют отнести их к родительским магмам, а узкие прямолинейные тренды указывают на существование однонаправленного магматического процесса, приводящего к формированию ВГ-АБ.



**Рис. 1-02.** Вариации содержаний примесных элементов (г/т) в зависимости от содержания MgO (мас. %) в породах базальт–андезибазальтовой серии Ключевского вулкана, использованы данные из [Арискин, Бармина, Озеров, Нильсен, 1995].

Совокупный анализ конфигураций спектров лантаноидов, нормированных на примитивный состав пород прорыва Булочка (рис. 1-03 а), и коэффициентов распределения этих элементов в системе минерал–расплав (рис. 1-03 б) показывают, что ведущим механизмом, определяющим разнообразие пород вулкана от ВМ-Б до ВГ-АБ, является фракционирование двух темноцветных минералов – оливина и клинопироксена.



**Рис. 1-03.** Спектры редкоземельных элементов серии пород Ключевского вулкана (а) и коэффициенты распределения микроэлементов между минералами и расплавом в базальтовой системе (б).

Геохимические данные по Ключевскому вулкану из [Almeev, Kimura, Ariskin, Ozerov, 2013], коэффициенты распределения элементов,  $K_{P(M-P)}$ , в системе минерал–расплав по [Rollinson, 1993].

Здесь и далее на графиках минералы представлены каждый своим цветом: ОI – желтым, Срх – зеленым, Орх – белым и Pl – серым.

Анализ петрохимических и геохимических данных дает общую картину эволюционных процессов и позволяет установить набор минералов, определяющих разнообразие базальтоидов Ключевского вулкана. Проследить полную эволюционную схему формирования пород серии, используя только петрохимические и геохимические построения, не представляется возможным. Для решения этого вопроса проведены детальные минералогические исследования породообразующих минералов и заключенных в них твердофазных кристаллических включений.

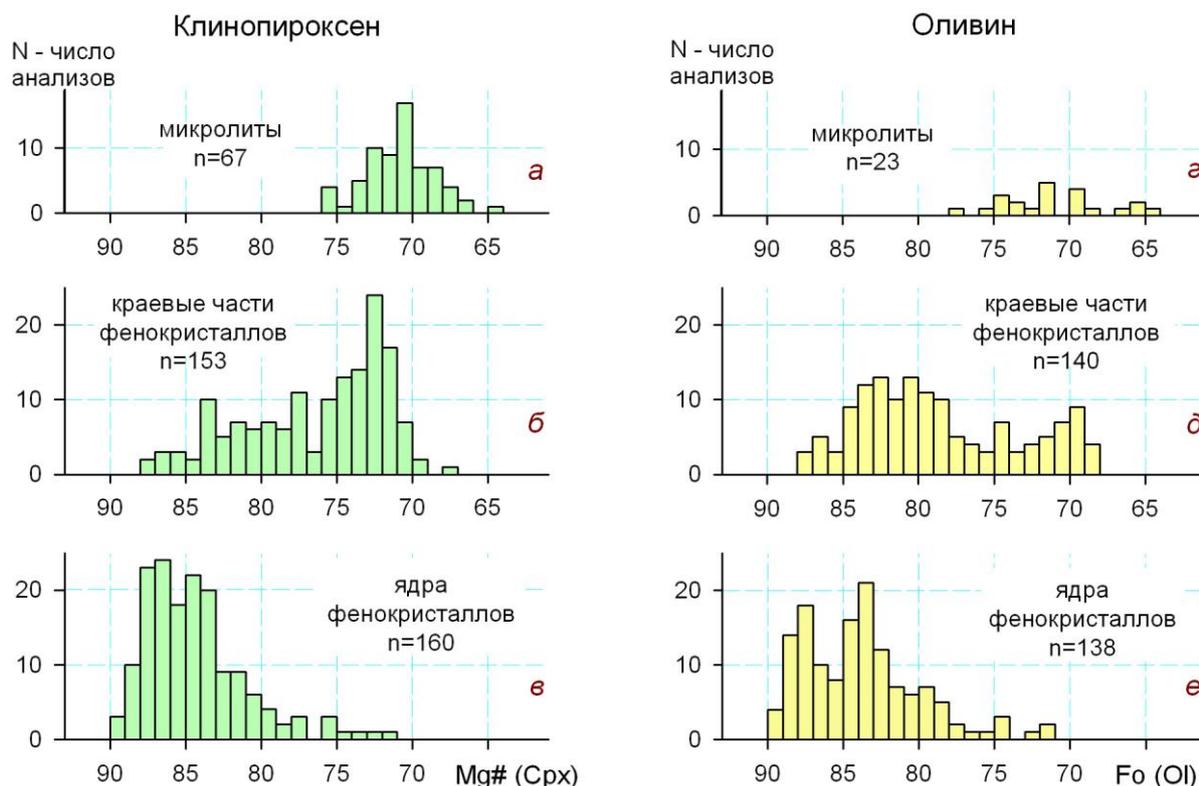
#### Закономерности поведения силикатных минералов пород Ключевского вулкана

Проведено исследование химического состава ОI и Срх из всех типов базальтоидов вулкана, а также твердофазных кристаллических включений в породообразующих минералах. Вначале представим вариации составов породообразующих минералов базальтоидов прорыва Юбилейный, выбранного в качестве эталонного объекта исследования ВГ-АБ, затем проведем сопоставление составов темноцветных минералов из всех типов базальтоидов Ключевского вулкана.

#### Тренды Срх, Орх, ОI и Pl из ВГ-АБ прорыва Юбилейный

В темноцветных минералах из ВГ-АБ прорыва Юбилейный железо-магниевое отношение изменяется в пределах: для Срх 90–64 (Mg#) и для ОI 90–64 (Fo) (рис. 1-

**04).** В этом интервале Mg# Crx и Fo Ol закономерно уменьшаются от центральных частей (ядер) фенокристаллов к их краевым частям и далее к микролитам.



**Рис. 1-04.** Гистограммы вариаций состава Crx (Mg#) и Ol (Fo) в ядрах, в краевых частях фенокристаллов и в микролитах из высокоглиноземистых базальтов (MgO=5,59 мас. %) прорыва Юбилейный, по [Озеров, Хубуня, 1992].

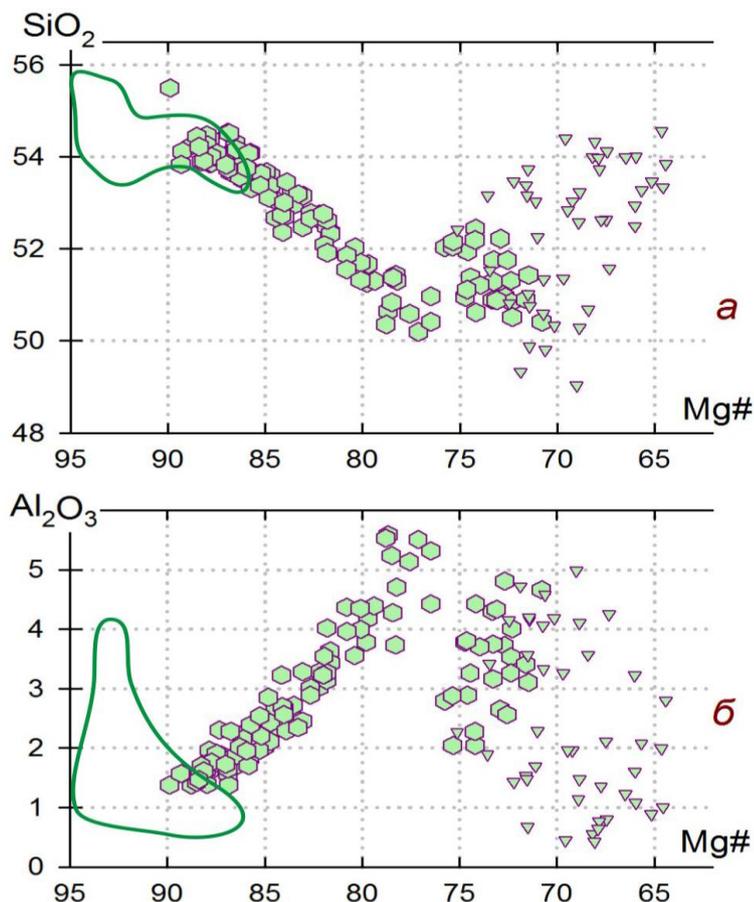
N – число анализов клинопироксена и оливина конкретного состава, n – общее число проанализированных зерен.

Рассмотрим особенности конфигурации трендов содержания породообразующих оксидов в минералах из андезибазальтов прорыва Юбилейный (Crx – **рис. 1-05**, Ol – **рис. 1-06** и Pl – **рис. 1-07**).

**Тренды Crx (рис. 1-05)** представляют серию непрерывно изменяющихся, эволюционирующих составов (90–64 Mg#). В начале тренда высокомагнезиальные составы ядер фенокристаллов (90–86 Mg#), близкие к мантийным ксенолитам, затем тренд формируется составами краевых частей фено-, субфенокристаллов и заканчивается составами низкомагнезиальных микролитов (64 Mg#), находящихся в основной массе – финальная стадия кристаллизации магматического расплава.

Тренды Crx формируются двумя, перекрывающимися друг друга, морфологически разными кристаллическими составляющими – фено-, субфенокристаллами (Mg# 89,9–70,8) и микролитами (Mg# 75,1–64,5). Проведено сопоставление интервалов перекрытия (**табл. 1.02**), интервал Mg# вкрапленников Crx был принят за 100 %. Такой подход показывает, что микролиты перекрывают 20 % интервала Mg# вкрапленников Crx.

Для трендов минералообразующих оксидов Crx характерны две тенденции: прямолинейная и двунаправленная. Первая – проявлена в прямолинейном увеличении или уменьшении концентраций TiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, FeO, Na<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MnO. Вторая – характерна для трендов SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (**рис. 1-05**), которые сначала эволюционируют в одном направлении, затем при Mg# 78–76 меняют направление практически на 90 %.



**Рис. 1-05.** Химические составы клинопироксенов из высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Юбилейный и из мантийных ксенолитов, по [Озеров, 1993].

Зеленые шестигранники – фенокристаллы Сrx, зеленые треугольники – микролиты Сrx. Оконтурены области составов Сrx из мантийных ксенолитов, по [Reid et al., 1974].

Содержание оксидов в Сrx в мас.%.

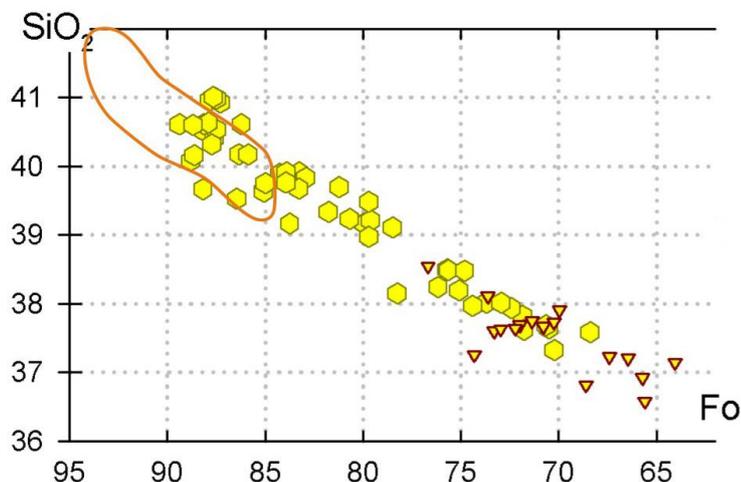
Рассмотрим ярко проявляющуюся тенденцию изменения направления тренда  $Al_2O_3$ –Mg# Сrx (**рис. 1-05 б**). В интервале Mg# 90–79 концентрация  $Al_2O_3$  возрастает в 4 раза (от 1,4 до 5,6 %), затем при Сrx Mg# 78 тренд резко меняет направление, и содержание  $Al_2O_3$  уменьшается в 14 раз (от 5,6 до 0,4 %). Поведение тренда показывает, что в процесс кристаллизации дополнительно включился мощнейший концентратор  $Al_2O_3$ . Единственным минералом, который может столь значительно понизить содержание  $Al_2O_3$  в расплаве, является плагиоклаз, а равномерное снижение широкого тренда от 5,6 мас.%  $Al_2O_3$  до низких значений – 0,4 мас.%  $Al_2O_3$ , говорит о постоянно продолжающейся кристаллизации Pl. Напомним, что в плагиоклазах ВГ-АБ концентрация  $Al_2O_3$  составляет 25–35 мас.% (**рис. 1-07**), т.е. примерно в 5 раз больше, чем в наиболее обогащенных  $Al_2O_3$  Сrx ~ 5 мас.%.

Сопоставление рассмотренного графика с аналогичными графиками Сrx из глиноземистых андезибазальтов прорывов Невидимка и Билюкай [Хубуня и др., 2012], показало, что поведение  $Al_2O_3$  относительно Mg# Сrx совпадает во всех деталях. Это иллюстрирует, что выделенные структурные особенности в изменении составов Сrx устойчивы и характерны не только для высокоглиноземистых, но и для глиноземистых андезибазальтов вулкана.

Дополнительно проанализирован двунаправленный тренд  $SiO_2$ –Mg# Сrx (**рис. 1-05 а**), который показывает, что изменение направления тренда также определяется кристаллизацией Pl.

Совокупный анализ зеркально симметричных графиков  $SiO_2$ –Mg# Сrx и  $Al_2O_3$ –Mg# Сrx (**рис. 1-05 а и б**) позволяет говорить о новом минералогическом типоморфном признаке, проявляющемся в химических составах Сrx, обусловленных появлением и массовой кристаллизацией Pl.

Составы ОI из пород прорыва Юбилейный (**рис. 1-06**) формируют четкие, однонаправленные тренды в Fo-интервале 90–64, которые позволяют рассматривать составы ОI как непрерывно развивающуюся серию, которая начинается от высоко-Fo ядер фенокристаллов, составы которых характерны для глубинных мантийных перидотитов, и эволюционирует до низко-Fo микролитов, представляющих конечную фазу кристаллизации магматического расплава.



**Рис. 1-06.** Зависимость содержания  $\text{SiO}_2$  по отношению к Fo в ОI из высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Юбилейный и из мантийных ксенолитов; по [Озеров, 1993].

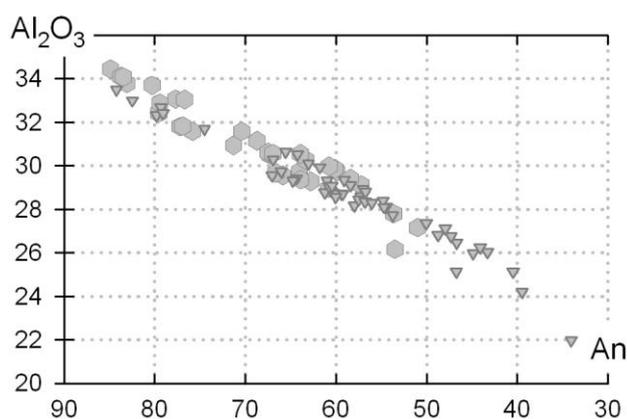
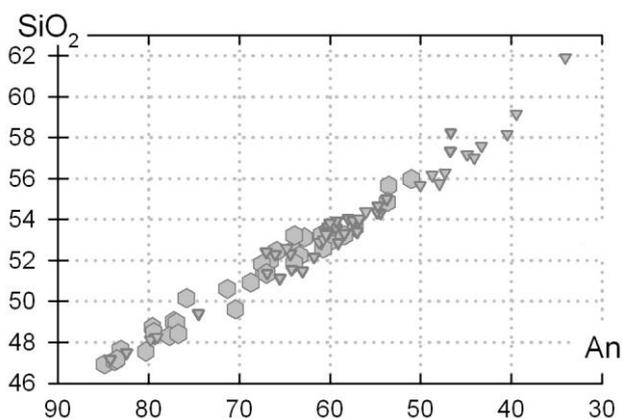
Желтые шестигранники – фенокристаллы ОI; желтые треугольники – микролиты ОI. Оконтурены области составов ОI из мантийных ксенолитов, по [Reid et al., 1974; Hervig et al., 1986].

Содержание оксидов в ОI в мас. %.

Прямолинейность трендов породообразующих оксидов оливина указывает на то, что оливин в процессе своего формирования не реагирует на появление и кристаллизацию плагиоклаза.

Fo-интервал, занимаемый фено-, субфенокристаллами ОI, – 89,4–68,4, а микролитами – 76,7–64,0; из этого следует, что микролиты перекрывают 30 % Fo-интервала вкрапленников (см. **табл. 1.02**).

Составы PI (**рис. 1-07**), наиболее распространенного минерала ВГ-АБ, формируют четкие, непрерывные, прямолинейные тренды (An-интервал – 84,8 до 34,0). Интервал составов микролитов (An – 84,2 до 34,0) на 98 % перекрывает интервал составов вкрапленников (84,8 до 51,0).



**Рис. 1-07.** Зависимость содержания в PI из высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Юбилейный минералообразующих оксидов по отношению к их анортитовой составляющей.

Серые шестигранники – вкрапленники PI, серые треугольники – микролиты PI.

Взаимоотношения трендов вкрапленников и микролитов в породообразующих минералах прорыва Юбилейный приведены в **табл. 1.02**. Интервалы перекрытия составляют для Srх – 20 %, ОI – 30 % и для PI – 98 %. Такое взаимоотношение

трендов показывает, что микролиты Сrx и Оl начинают образовываться, когда из расплава уже выкристаллизовалась значительная часть фено- и субфенокристаллов рассматриваемых темноцветных минералов. Интервал перекрытия для Рl в 98 % дает основание полагать, что кристаллизация вкрапленников и микролитов Рl происходила одновременно.

<b>Таблица 1.02.</b> Интервалы составов вкрапленников и микролитов породообразующих минералов прорыва Юбилейный			
Интервалы \ Минералы	Сrx Mg#	Оl Fo	Рl An
Общий (вкраплен. + микролиты)	<b>89,88–64,42</b>	<b>89,39–64,05</b>	<b>84,87–34,04</b>
Вкрапленники	<b>89,88–70,79</b>	<b>89,39–68,40</b>	<b>84,87–51,02</b>
Микролиты	<b>75,13–64,42</b>	<b>76,69–64,05</b>	<b>84,22–34,04</b>
Перекрытие вкрапленников и микролитов (в единицах измерения)	5	8	33
Перекрытие вкрапленников микролитами (%)	20 %	30 %	98 %

Общие закономерности поведения силикатных минералов в породах Ключевского вулкана

В диссертационной работе проведен сравнительный анализ интервалов Mg# ядер фенокристаллов Сrx из высокоглиноземистых, глиноземистых, магнезиальных и высокомагнезиальных пород вулкана [Озеров, Хубуня, 1992]. Данные по интервалам Mg# ядер Сrx из ВГ-АБ (от 89 до 79–77) близки таковым из Г-АБ, М-АБ и ВМ-Б (от 89–87 до 80–76). Это определенно показывает, что они близки между собой.

Аналогичное сопоставление выполнено для Fo-составляющие ядер Оl [Озеров, Хубуня, 1992]. Наиболее высоко-Fo составы ядер Оl и первые максимумы частот встречаемости (max) для высокоглиноземистых андезибазальтов – 89 и 90, max = 87; для глиноземистых андезибазальтов – 90, max = 88; для магнезиальных андезибазальтов – 90, max = 87 и для высокомагнезиальных базальтов – 91, max = 88–89. Анализ гистограмм показывает значительное сходство Fo-составляющей ядер Оl из всех типов базальтоидов.

Сравнительный анализ клинопироксенов из разных типов пород вулкана, представленный на диаграммах Wo–En–Fs, показывает, что на всех графиках тренды Сrx начинаются в поле эндиопсида, проходят между салитом–авгитом, затем уходят в поле авгита, субкальциевого авгита и заканчиваются в поле пижонита. Четкие, сходные, однонаправленные тренды (от ядер фенокристаллов через их краевые части к микролитам) иллюстрируют, что и начало образования Сrx и последующий процесс его эволюционной кристаллизации имеют один и тот же устойчивый путь развития для высокоглиноземистых, магнезиальных и высокомагнезиальных базальтоидов.

Анализ поведения трендов силикатных минералов высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Юбилейный позволил получить важную генетическую информацию. Каждый из трендов Сrx и Оl проходит полный эволюционный путь развития от высоко-Mg#/высоко-Fo глубинных разностей (по составу соответствующих таковым из мантийных ксенолитов) до низко-Mg#/низко-Fo микролитов, формирующихся в поверхностных условиях. Близость составов ядер

клинопироксенов и оливинов из всех типов базальтоидов Ключевского вулкана позволяет считать, что начало их кристаллизации происходило из магматического расплава, изначально более магнезиального по составу, чем высокоглиноземистые базальты. А сходство химических трендов  $Sr_x$  показывает, что последующий путь формирования  $Sr_x$  от зарождения первого кристалла до появления последнего микролита был идентичен для высокоглиноземистых, магнезиальных и высокомагнезиальных базальтоидов вулкана.

В ВГ-АБ прорыва Юбилейный кристаллизация PI начинается в области средне-Mg#  $Sr_x$  и далее этот парагенезис прослеживается вплоть до последнего микролита  $Sr_x$ . Анализ литературных источников показал, что установленные закономерности, связанные с кристаллизацией PI, характерны и для глиноземистых андезибазальтов вулкана.

Минералогические исследования проливают свет на взаимоотношение минералов в породах вулкана. Однако прямых наблюдений, показывающих конкретные взаимоотношения породообразующих  $Sr_x$ -OI и OI-PI нам получить не удалось. Чтобы восстановить полную историю формирования ведущих минеральных фаз и определить конкретные парные составы сокристаллизующихся минералов было проведено исследование твердофазных включений в минерале-хозяине.

#### Устойчивые парагенезисы Ключевского вулкана по результатам исследований твердофазных включений в породообразующих минералах

Исследование твердофазных включений позволяет определить состав ранней ликвидусной ассоциации и последовательность кристаллизации минералов из расплава. Твердофазные включения – силикатные и рудные – обнаружены в породообразующих минералах во всех типах пород вулкана.

Рассмотрим силикатные включения в породообразующих минералах, затем рудные – шпинель и магнетит. Составим парагенетическую схему последовательного изменения составов минеральных фаз пород вулкана.

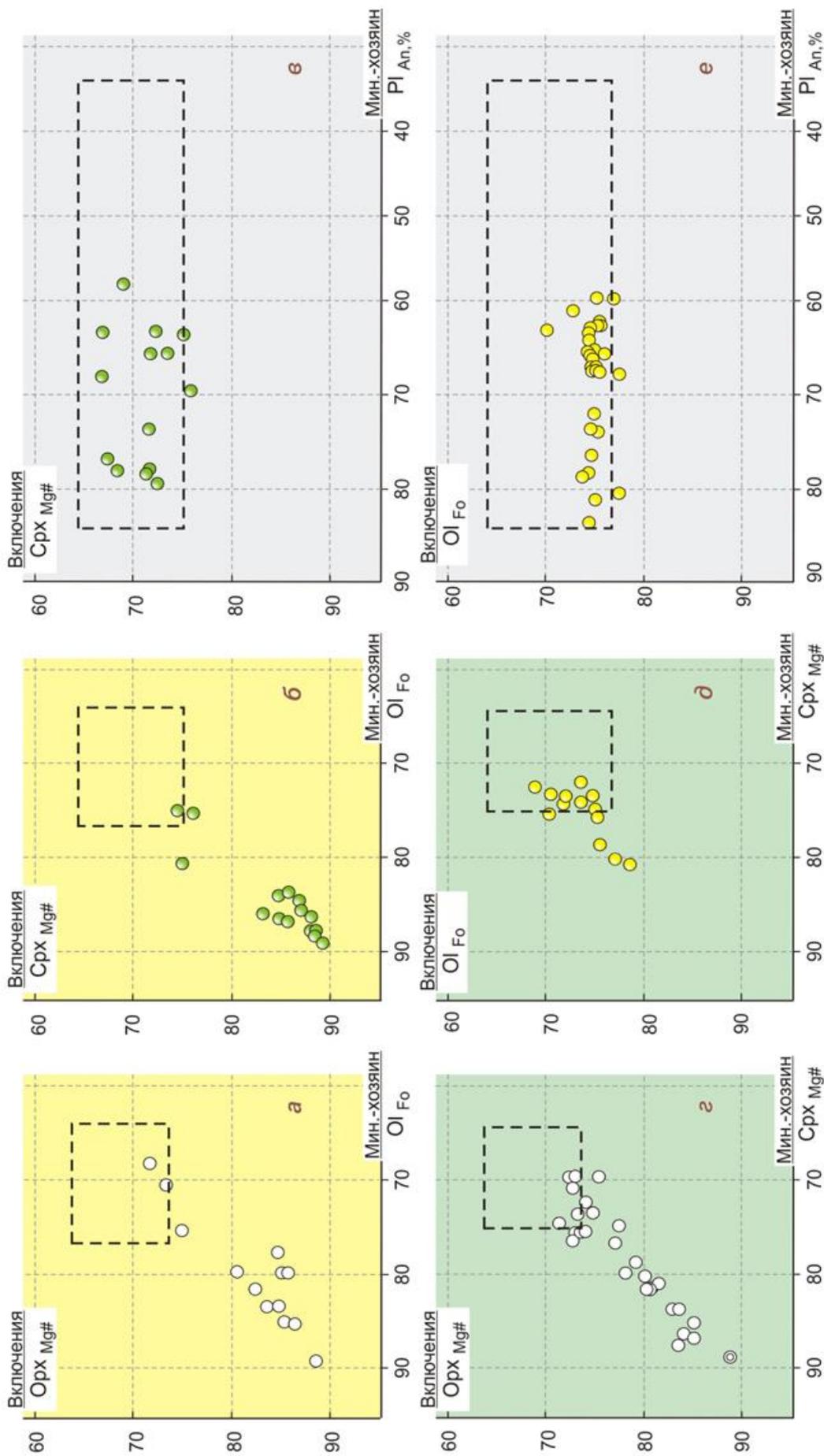
#### Твердофазные силикатные микровключения

Результаты исследований включений в минералах ВГ-МБ прорыва Юбилейный представлены на **рис. 1-08**. Дополнительно на все графики нанесены поля составов микролитов (черные пунктирные прямоугольники), которые несут важную генетическую информацию о сокристаллизующихся фазах на заключительной стадии становления расплава.

Из **рис. 1-08 а, б, г и е** видно, что кристаллизация трех темноцветных минералов в расплаве началась одновременно – OI ( $Fo \sim 89$ ),  $Sr_x$  ( $Mg\# \sim 89$ ) и  $Or_x$  ( $Mg\# \sim 89$ ). Последующая совместная кристаллизация происходила с постепенным обеднением расплава MgO и формированием более железистых разностей. Котектическая кристаллизация этих минералов продолжалась вплоть до низко-Mg#/низко-Fo (64) микролитов.

Тренды минерал-хозяин PI-твердофазные включения (**рис. 1-08 в и е**) принципиально отличаются от трендов минерал-хозяин  $Sr_x$ -твердофазные включения и минерал-хозяин OI-твердофазные включения (**рис. 1-08 а, б, г и е**), для которых характерно синхронное от начала до конца изменение составов. Совокупный анализ показывает, что плагиоклаз начал образовываться после того, как из расплава уже выкристаллизовались высоко- и средне-Mg#/Fo оливины, клино- и ортопироксены. В результате произошло обеднение расплава MgO и за счет этого

обогащение его  $Al_2O_3$ , что создало условия, обеспечивающие кристаллизацию плагиоклаза.



**Рис. 1-08.** Зависимость состава силикатных включений (Ol, Сpx, Оpx) от состава заключающего их минерала-хозяина (Ol, Сpx, Pl) и поля составов сосуществующих микролитов силикатных минералов из высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Юбилейный (MgO=5,59 мас. %); по [Ozerov, 1993; Ozerov, 2000].  
 а – Оpx<sub>Mg#</sub> включ. и Ol<sub>Fo</sub> минер.-хозяин; б – Сpx<sub>Mg#</sub> включ. и Ol<sub>Fo</sub> минер.-хозяин; в – Сpx<sub>Mg#</sub> включ. и Pl<sub>An</sub> минер.-хозяин; г – Оpx<sub>Mg#</sub> включ. и Ol<sub>Fo</sub> минер.-хозяин; д – Ol<sub>Fo</sub> включ. и Сpx<sub>Mg#</sub> минер.-хозяин; е – Ol<sub>Fo</sub> включ. и Pl<sub>An</sub> минер.-хозяин. Двойным кружком на рис. г отмечены данные по Mg# сингенетичных включений Сpx и Оpx (подробнее см. в тексте). Поля составов микролитов для указанной по осям пары минералов представлены черными пунктирными прямоугольниками.

Можно высказать предположение о скорости роста Pl относительно Ol и Crx. По результатам изучения включений, очевидно, что в ходе кристаллизации Pl – в широком диапазоне его составов (An 84–58) – захватывались включения Ol и Crx средне-, низко-Fo/Mg#. Таким образом, вкрапленники Pl выросли за то время, пока в расплаве кристаллизовались Ol Fo 77–70 и Crx Mg# 75–67. Поскольку размеры фенокристаллов Pl сопоставимы с таковыми Ol и Crx, то можно предположить, что скорость роста плагиоклаза была существенно выше скорости роста темноцветных минералов.

Заканчивая описание взаимоотношения минерала-хозяина Pl с включениями Ol и Crx дополнительно отметим, что в работе [Миронов, 2009] проведено прямое графическое сопоставление наших, вышеизложенных данных, с аналогичными данными для минеральных ассоциаций высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Апахончич.

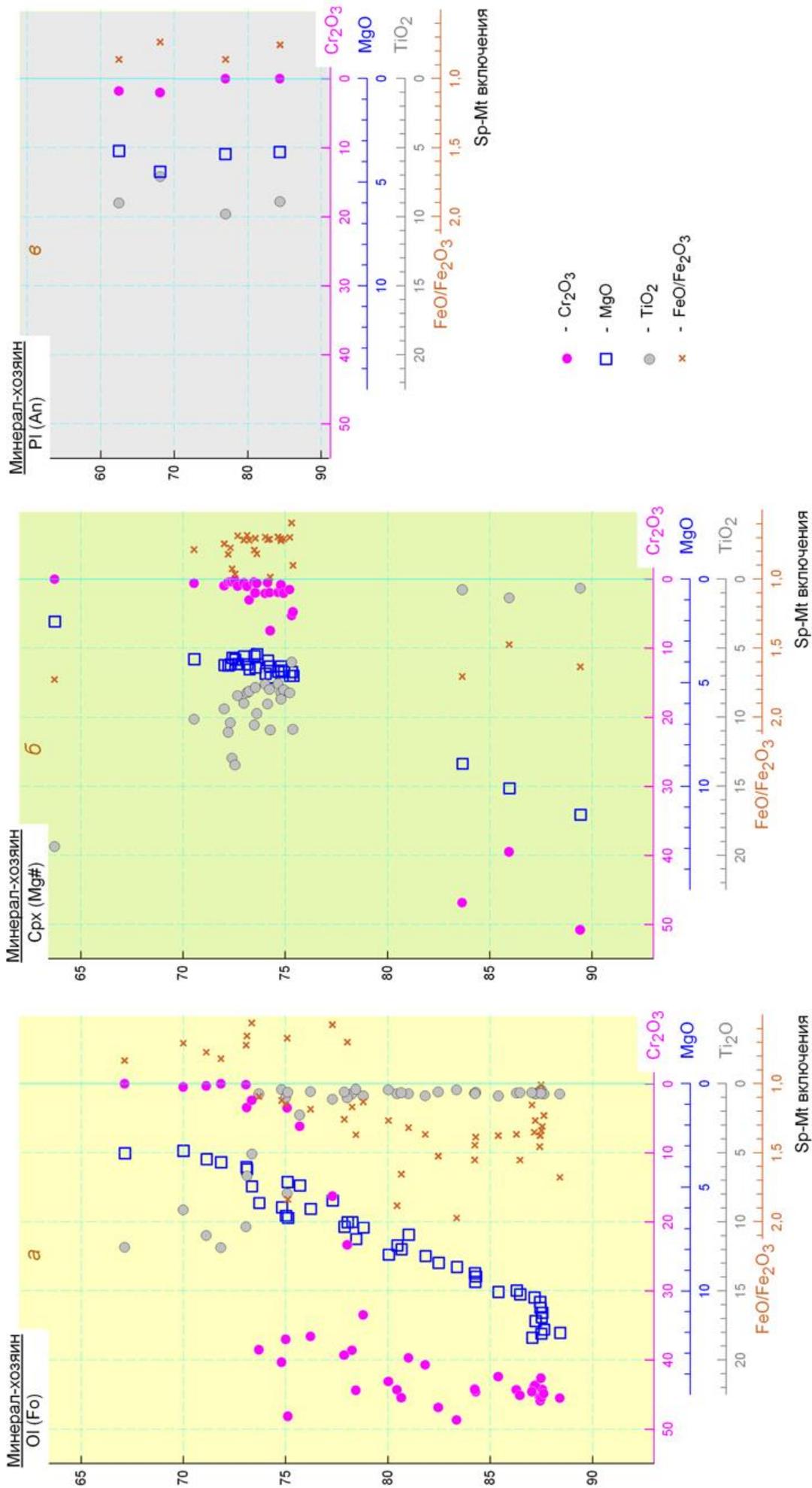
Итак, полное совпадение результатов исследований показывает, что наличие низко- и средне-Fo/Mg# включений Ol и Crx во вкрапленниках Pl является характерной чертой ВГ-АБ Ключевского вулкана.

#### Твердофазные микровключения шпинелидов

Дополнительную информацию об эволюции расплава, из которого образовались ВГ-АБ, дает изучение включений шпинелидов в Ol, Crx и Pl. Количество включений шпинелидов в породообразующих минералах изменяется от единиц до многих десятков. Составы включений в породообразующих минералах представлены на графиках **рис. 1-09**.

Совокупный анализ трех графиков позволяет сделать следующие выводы: из расплава началась кристаллизация одновременно двух темноцветных породообразующих минералов – оливина (Fo ~ 88,5), клинопироксена (Mg# ~ 89,5), которые формировались с высокохромистой шпинелью (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 39–50 %), имеющей высокие содержания MgO – 11–12 мас.%. Последующая совместная кристаллизация оливина и клинопироксена происходила с синхронным уменьшением значений Fo и Mg# при продолжающемся выделении высокохромистой шпинели, содержание MgO в которой неизменно уменьшалось. В интервале Fo 77–74 происходит смена состава рудных включений и начинается кристаллизация включений титаномагнетита. В это же время начинает кристаллизоваться и породообразующий Pl, на что указывает отсутствие в плагиоклазах включений хромистой шпинели. Таким образом, исследование рудных включений дает еще одно свидетельство о месте плагиоклаза в ряду последовательности кристаллизации минералов высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Юбилейный. Образование фенокристаллов плагиоклаза происходило в то время, когда из расплава кристаллизовались низко-Fo Ol и низко-Mg# Crx.

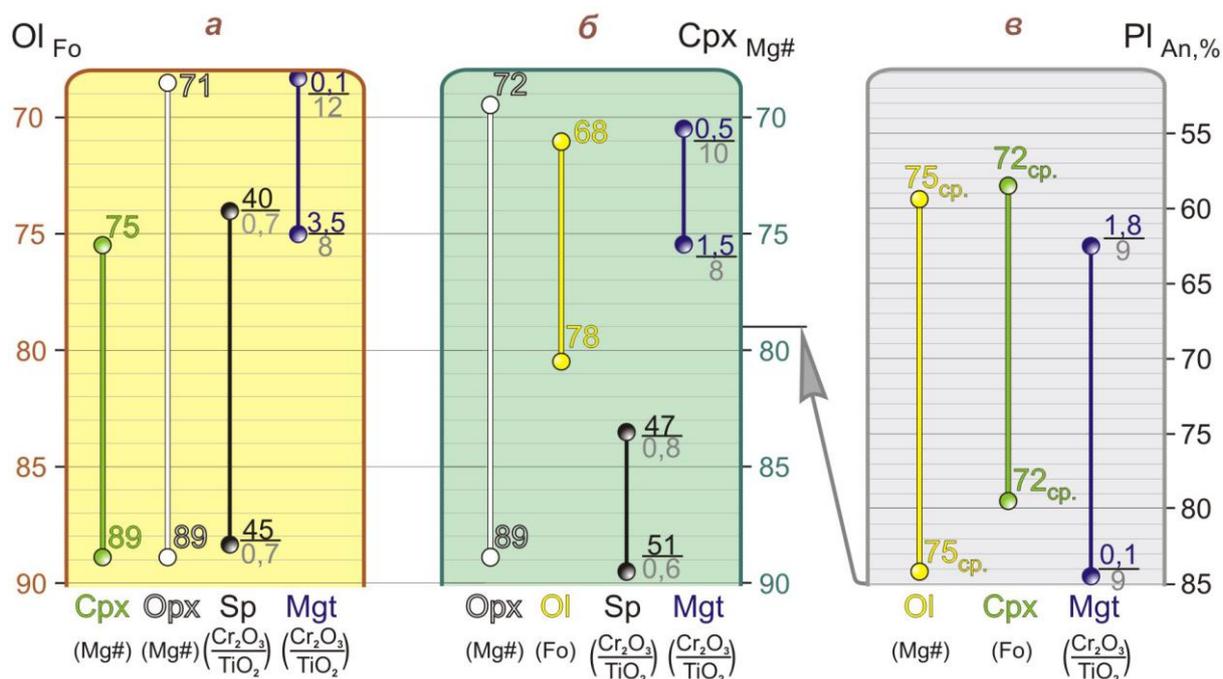
Применимость результатов, полученных при изучении пород Юбилейного прорыва, ко всей серии пород Ключевского вулкана дополнительно подтверждается данными [Миронов, 2009]. Анализ этих данных позволил прийти к заключению, что установленные нами для включений рудных минералов в оливинах закономерности характерны как для высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Апахончич, так и для высокомагнезиальных базальтов прорыва Булочка.



**Рис. 1-09.** Зависимость содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MgO (мас.%) и отношения FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> во включениях ряда шпинель (Sp) – магнетит (Mgt) и состава минерала-хозяина оливина (Fo) – а; клинопироксена (Mg#) – б; плагиоклаза (An, %) – в – в высокоглиноземистых андезибазальтах прорыва Юбилейный. По [Озеров, 1993 и Озеров, 2000].

Области кристаллизации твердофазных включений (силикатных и рудных)  
в минерале-хозяине Ol, Crx и Pl из ВГ-АБ

Полученные данные позволили составить картину парагенетических взаимоотношений силикатных и рудных включений во вкрапленниках породообразующих минералов высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Юбилейный (рис. 1-10).



**Рис. 1-10.** Парагенетическая схема взаимоотношений минеральных фаз из высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Юбилейный, по [Озеров, 1993].

Цветными прямоугольниками схематически изображены минерал-хозяин: а – оливин (Fo), б – клинопироксен (Mg#) и в – плагиоклаз (An).

Кружки, соединенные прямыми линиями, обозначают интервалы составов силикатных и рудных включений в минерале-хозяине. Стрелкой показаны составы Ol Fo и Crx Mg#, при которых началась кристаллизация вкрапленников плагиоклаза.

Сведения о газовой фазе в породообразующих минералах

Согласно литературным данным, дегазация магматического расплава Ключевского вулкана, обусловленная отделением CO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O флюида, начинается на глубинах 20–18 км [Хубуня, Гонтовая, Соболев и др., 2007], 30–10 км [Мионов, Портнягин, 2011] и продолжается вплоть до выхода магм на поверхность.

Общее заключение о устойчивых минеральных парагенезисах пород Ключевского вулкана

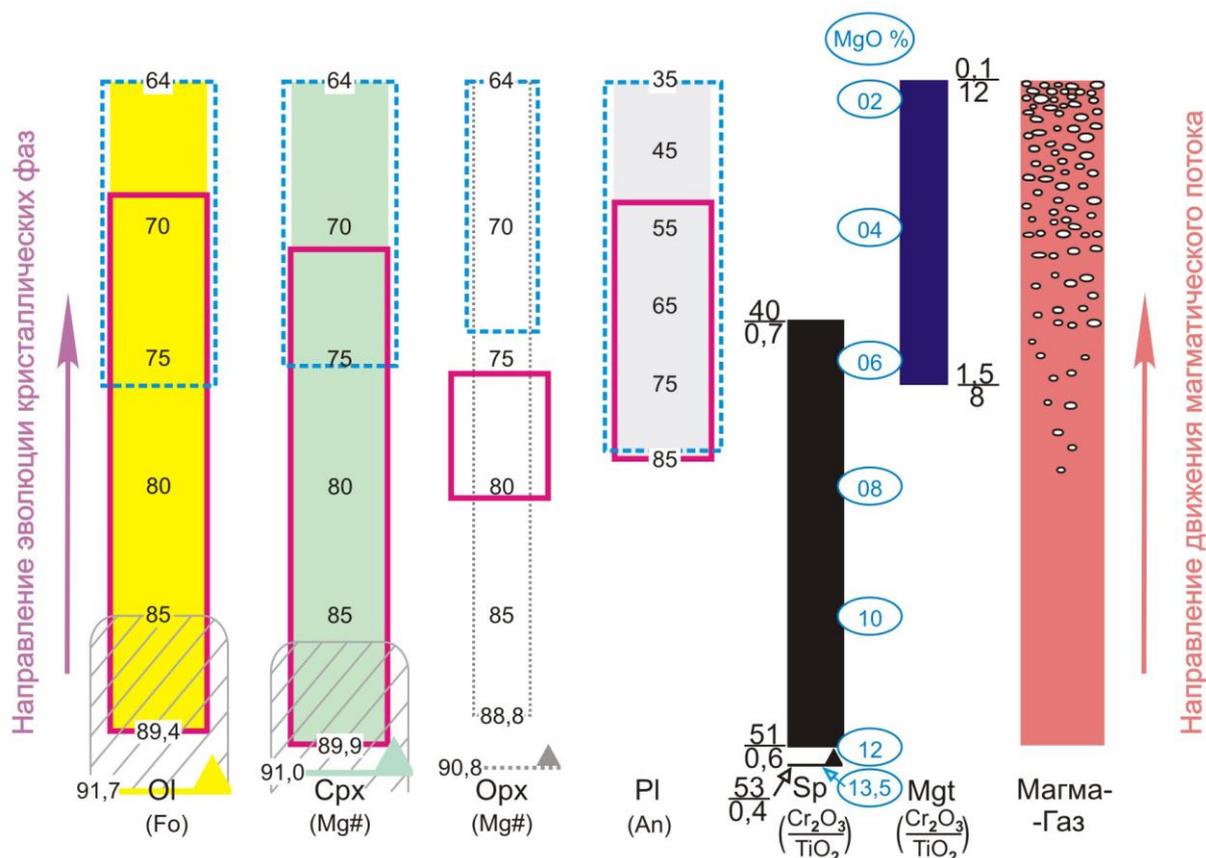
По результатам исследования составов породообразующих минералов и твердофазных микровключений в породообразующих минералах составлена схема минеральных парагенезисов пород Ключевского вулкана (рис. 1-11). Итоговая схема приводится впервые, ниже представлены ее главные особенности:

1. Схема учитывает все ключевые парагенетические составляющие магматической ассоциации пород Ключевского вулкана. На ней представлены составы сокристаллизующихся минералов согласно последовательности образования минеральных фаз (снизу–вверх), показаны интервалы составов фенокристаллов, микролитов и микровключений в минерале-хозяине.

2. В основу построения схемы положены данные о минеральных фазах прорыва Юбилейный. Его ВГ-АБ являются конечным членом эволюционной серии

пород вулкана, они прошли весь путь преобразований, поэтому в минералах записана история кристаллизации формирующегося расплава.

3. Высокоглиноземистые андезибазальты, используемые в качестве базовых, имеют полный набор породообразующих минералов. Для них, помимо темноцветных и рудных минералов, характерен плагиоклазовый парагенезис, который проявляется в фено-, субфенокристаллах и микролитах, а в высокомагнезиальных базальтах плагиоклаз развит только в виде микролитов.



**Рис. 1-11.** Схема минеральных парагенезисов пород Ключевского вулкана и выделения флюидной фазы из расплава.

Ol, Cpx, Pl – породообразующие минералы – широкие полосы; Opx, Sp, Mgt – акцессорные минералы – узкие полосы. Области составов микролитов силикатных минералов – синий пунктир. Содержание MgO мас. % в Sp и Mgt показано цифрами синего цвета в эллипсах. В нижней части колонок Ol, Cpx, Opx и Sp приведены максимальные составы минералов (прямые линии с треугольником) Ключевского вулкана.

Поля составов Ol и Cpx из мантийных ксенолитов, по [Reid et al., 1974; Hervig et al., 1986] изображены серой косой штриховкой. Правая колонка, иллюстрирующая появление и увеличение газовой фазы в расплаве, построена с использованием данных [Хубуная, Гонтовая, Соболев и др., 2007 и Миронов, Портнягин, 2011]

4. На схеме в виде прямых линии с треугольником приведены составы наиболее высоко-Fo Ol, высоко-Mg# клино-, ортопироксенов и наиболее высокохромистой шпинели из высокомагнезиальных и магнезиальных пород вулкана. Такое изображение позволяет представить полный спектр составов минералов Ключевского вулкана и провести сравнение между составами минералов высокомагнезиальных и высокоглиноземистых базальтоидов.

5. Дополнительно, в качестве мантийного маркера, в нижней части колонок Ol и Cpx косой штриховкой приведены диапазоны составов минералов из мантийных ксенолитов [Reid et al., 1974; Hervig et al., 1986], позволяющие составить

представление о глубинных условиях начального этапа формирования минеральной ассоциации Ключевского вулкана.

Последовательность кристаллизации минералов в расплавах вулкана можно представить следующим образом. Сначала кристаллизовались наиболее высоко-Fo ОI и высоко-Mg# Сrx, Орх, позднее образовался PI в ассоциации с низко-Fo ОI и низко-Mg# Сrx. Среди рудных минералов первой кристаллизовалась хромистая шпинель, ассоциирующаяся с высоко-Fo ОI и высоко-Mg# Сrx; в дальнейшем в ходе кристаллизации она сменяется титаномагнетитом, образующимся совместно с низко-Fo ОI и низко-Mg# Сrx.

Представленные на **рис. 1-11** данные позволили получить полную картину выделения кристаллических фаз, записанную в составах минералов, и показать, что ряды составов минеральных фаз прошли полный путь эволюционного развития от глубинных высокомагнезиальных расплавов до поверхностных высокоглиноземистых разностей. Приведенные данные демонстрируют, что два породообразующих минерала – ОI и Сrx обеспечивают эволюционные преобразования магматической серии Ключевского вулкана.

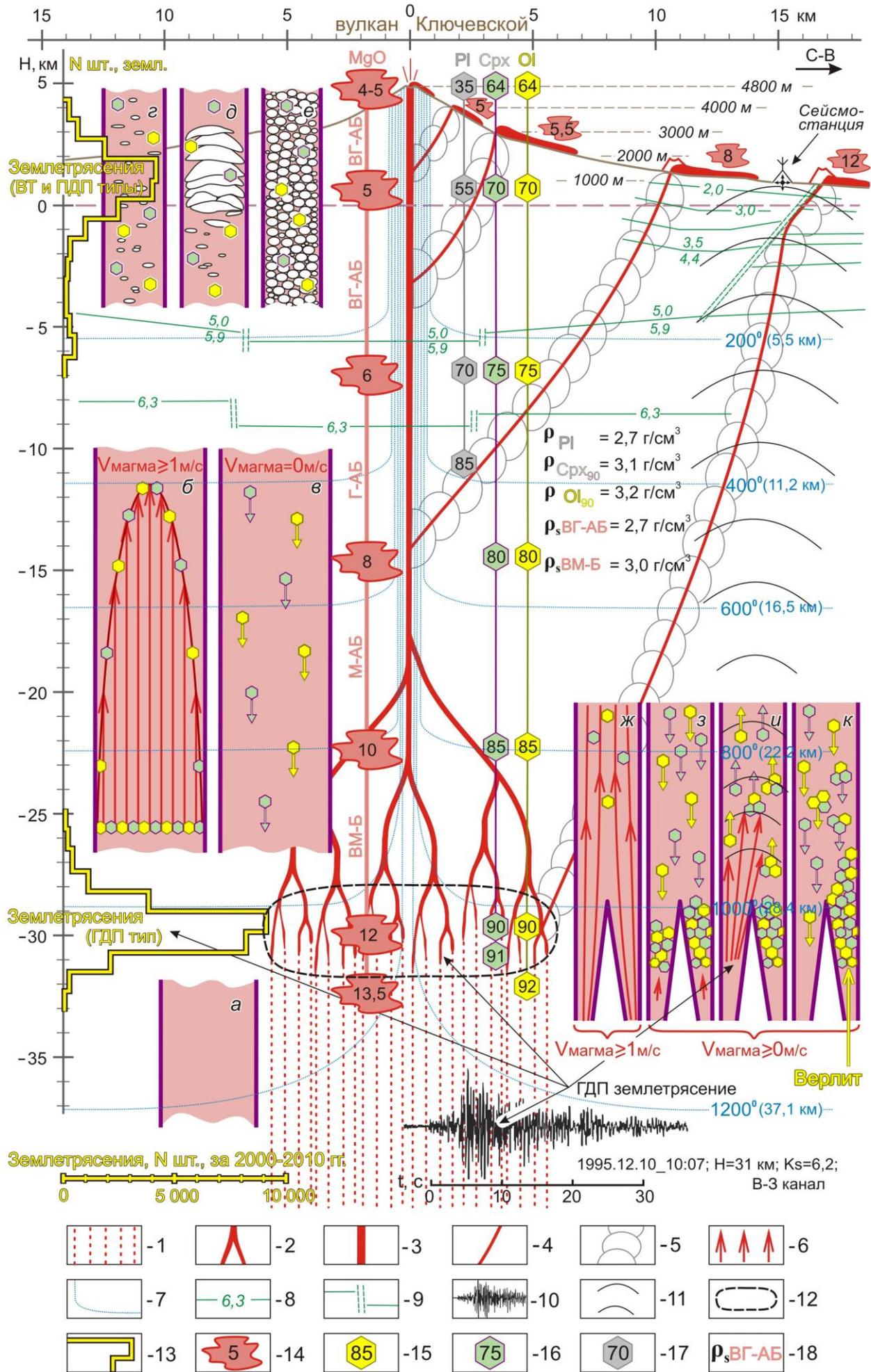
Для решения вопроса об объемах кристаллизующихся фаз и составе расплава было выполнено численное моделирование с использованием программы КОМАГМАТ [Ariskin et al., 1993]. Рассчитана оптимальная модель, отвечающая условиям декомпрессионного фракционирования исходной высокомагнезиальной магмы в присутствии нескольких процентов воды. Показано, что кристаллизация исходной магмы (MgO около 12 мас. %) начинается с ОI–Сrx котектики (Fo 90 и Mg# 90). Затем ОI и Сrx фракционируют совместно. При степени фракционирования системы 35 %, химический состав расплава достигает значений ВГ-АБ (около 5 мас.% MgO).

#### Механизм формирования магматической серии пород Ключевского вулкана

Результаты настоящего исследования, анализ материалов по Ключевскому вулкану и литературные данные об особенностях подъема мантийных магм позволили предложить геологическую схему-модель образования серии пород вулкана (**рис. 1-12**). Особенность модели в том, что петрологические процессы,

**Рис. 1-12.** Схематическая модель образования высокомагнезиальной–высокоглиноземистой базальт-андезиобазальтовой серии пород Ключевского вулкана. →

1 – рассеянное движение расплавов в верхней мантии по разломам (жилам), по [Савельева, Соболев, Батанова и др., 2008; Батанова, Савельева, 2009]; 2 – соединяющиеся магматические каналы, конфигурация по [Kelemen, Braun, Hirth, 2000]; 3 – генеральный магмовод Ключевского вулкана; 4 – одноразовые каналы побочных прорывов; 5 – веерообразные трещины, транспортирующие расплавы побочных извержений; 6 – векторы относительной скорости расплавов; 7 – изотермы, данные из [Сугробов, Яновский, 1991]; 8 и 9 – сейсмические границы и предполагаемые разломы, данные ГСЗ [Балеста, Гонтовая, Каргопольцев и др., 1991]; 10 – глубокое длиннопериодное (ГДП) землетрясение, по [Горельчик, Сторчеус, 2001]; 11 – сейсмические волны от ГДП землетрясения; 12 и 13 – область распространения ГДП землетрясений и количество землетрясений на глубинах до 40 км за 2000–2010 гг. [Сенюков, 2013]; 14 – содержание MgO (мас.%) в расплаве; 15, 16, 17 – кристаллы ОI (Fo), Сrx (Mg#), PI (An) по [Ozerov, 2000]; 18 – плотность твердой компоненты пород вулкана [Ладыгин, Фролова, 2002]. При построении модели использованы петрологические данные из [Арискин, Бармина, Озеров и др., 1995; Озеров, Арискин, Бармина, 1996] и сейсмологические данные из [Аносов и др., 1978; Федотов, Жаринов, Горельчик, 1988].



определяющие разнообразие магм, рассматриваются в связи с вулканической деятельностью.

Ключевской вулкан расположен в 170 км над поверхностью погружающейся Тихоокеанской литосферной плиты. Генерация магм происходит в надсубдукционной области. Сначала образуется флюидный поток, затем рассеянный поток расплавов, который трансформируется в рассеянное движение расплавов по разломам. На глубине ~30 км происходит формирование вертикальных каналов и их последующее объединение, в результате образуется магмоподводящая система вулкана.

Формирование многообразия магматических расплавов вулкана (MgO 12,3–4,1 мас.%) происходит в 35-километровом постоянно действующем генеральном магмоводе. В его нижнюю часть поступают высокомагнезиальные базальтовые расплавы (**рис. 1-12 а**).

Во время вершинных извержений происходит активный подъем магматического расплава, и гипсометрически более низкие горячие магнезиальные порции расплава, содержащие OI и Crx с высокой концентрацией MgO, попадают в расположенные выше более холодные глиноземистые порции расплава (**рис. 1-12 б**). Происходит химическое взаимодействие расплавов и физическое смешение минеральных фаз. Реализуется процесс автосмещения нижних и верхних дочерних порций расплава. Многократное повторение циклов автосмещения увеличивает содержание MgO в вышерасположенных расплавах и привносит в глиноземистые порции высоко-Fo OI и высоко-Mg# Crx, нехарактерные для этих составов магм. В период между вершинными извержениями общая скорость подъема расплава в генеральном магмоводе снижается до нуля. На первый план выходит процесс фракционной отсадки OI и Crx. Вся масса минералов движется вниз (**рис. 1-12 в**). Петрохимический состав верхних уровней расплава обедняется MgO и обогащается Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В результате в верхней части генерального магмовода формируются высокоглиноземистые базальтоиды, вниз по магмоводу они постепенно сменяются глиноземистыми, магнезиальными и высокомагнезиальными составами.

Для образования непрерывной серии пород вулкана важную роль играют способы выведения магм на дневную поверхность. В ходе вершинных извержений поступают только высокоглиноземистые андезибазальты, так как они находятся в верхней части магмовода. Во время побочных извержений магма не использует проторенный путь генерального магмовода, а прокладывает новый путь – сквозь вышележащую толщу пород. Расплав попадает в условия более низких температур. За счет этого увеличивается его вязкость, снижается подвижность минеральных фаз, теряется их способность к фракционированию. Вещество консервируется. Расплав не может эволюционировать и поступает на поверхность практически в том виде, в котором он отделился от генерального магмовода.

Показано, что для формирования серии пород Ключевского вулкана (MgO 12,3–4,1 мас.%) необходимо: 1) чтобы в генеральном магмоводе в результате двух процессов – автосмещения расплавов и декомпрессионного фракционирования OI и Crx – сформировалось все разнообразие магм; 2) чтобы магматические расплавы достигали поверхности двумя различными способами – по генеральному магмоводу – через вершинный кратер (MgO в расплаве 4–5 мас.%) и по одноразовым трещинам/каналам – через боковые прорывы (MgO в расплаве 5–12 мас.%).

Защищаемое положение Главы 1 – см. Введение, стр. 5.

## ГЛАВА 2.

### ПЕРИОДИЧНОСТИ В ДИНАМИКЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА

Цель исследований – изучение периодичностей в динамике извержений Ключевского вулкана, выделение двух новых режимов извержений – пульсирующего фонтанирования и периодического фонтанирования, описание их характеристик.

Основной метод – анализ эруптивных периодических процессов по литературным данным, изучение динамических параметров современных извержений, оцифровка первичных записей вулканического дрожания, получение непрерывных рядов сейсмических данных, построение графиков временных вариаций огибающей амплитуды вулканического дрожания и обработка их методами математической статистики.

Объект исследования – вершинные и побочные извержения андезибазальтовых расплавов; повторяющиеся процессы в динамике эруптивной деятельности, проявляющиеся во временном интервале от секунды до нескольких суток; пульсирующее фонтанирование, стромболианские взрывы и периодическое фонтанирование.

#### 2.2. Периодичности в динамике извержений Ключевского вулкана 1932–1984 гг.

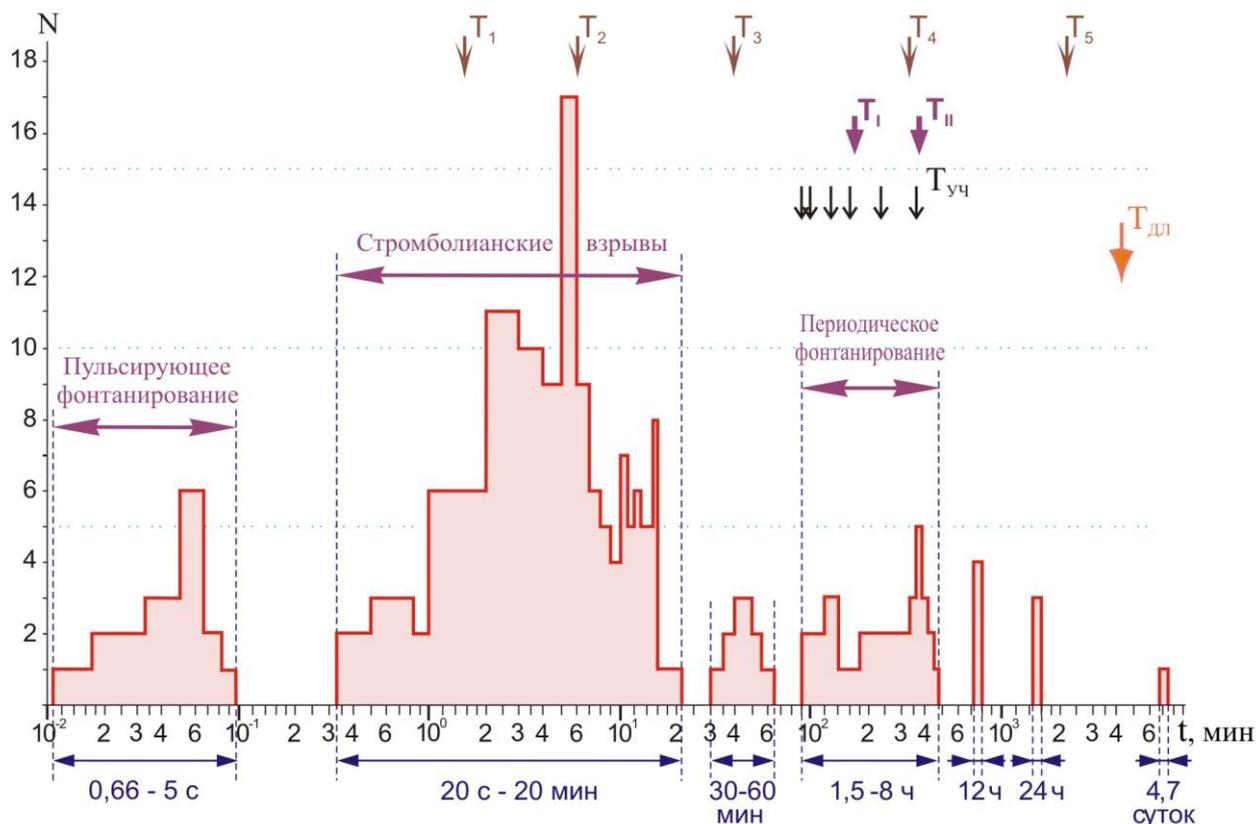
Систематические исследования Ключевского вулкана начались с 1932 г. С этого времени в работах вулканологов, геологов и географов можно найти указания на конкретные периоды в эруптивной деятельности вулкана, которые проявлялись в ритмичном характере выбросов пепла, бомб, фонтанировании лавы и парогазовых выделений. Автором проведен анализ подобных сведений с 1932 г. по 1978 г. и приведены собственные данные, полученные при изучении извержений 1983–1984 гг.

Полный обзор материалов о периодичностях в динамике извержений за 52 года представлен на гистограмме (**рис. 2-01**). Анализ гистограммы и материалов режимных наблюдений позволил классифицировать периодические явления и выделить 5 групп периодичностей, из них 4 группы относятся к вулканическим (3 основных и 1 промежуточная) и 1 группу следует рассматривать как наведенную, вызванную внешним лунно-солнечным воздействием. Основные группы: пульсирующее фонтанирование (0,67–5 с) – усиленные ритмичные пульсации в струе фонтанирующих раскаленных бомб; стромболианские взрывы (1–20 мин) – одиночные выбросы/взрывы вулканического пепла и/или раскаленных бомб; периодическое фонтанирование (1 ч 30 мин – 8 ч) – чередование этапов фонтанирования раскаленных бомб с этапами значительного ослабления эксплозивной деятельности или даже полного покоя, интервалы ослабления обычно имеют большую продолжительность.

Выполненные исследования показали, что одним из основных свойств магматической системы Ключевского вулкана является генерация периодических процессов, проявляющихся во временных диапазонах – секунды, минуты, часы, сутки.

Детально охарактеризовать периодические проявления вулканических сил можно только методами статистического анализа, применяемого для протяженных рядов данных, непрерывно получаемых инструментальными методами. Именно поэтому, для продолжения исследований периодических явлений было изучены

временные вариации вулканического дрожания, регистрируемого во время извержений Ключевского вулкана.



**Рис. 2-01.** Распределение наблюдаемых периодов в эруптивной деятельности Ключевского вулкана с 1932 г. по 1984 г.

По оси ординат – количество описанных периодических проявлений по литературным данным, N. По оси абсцисс – в логарифмическом масштабе период, t, мин. Под графиком, стрелками синего цвета, указана продолжительность выделенных периодических интервалов.

Вертикальными стрелками показаны основные периоды, выделенные по сейсмическим данным во время извержений 1978 г. – желто-коричневая стрелка – T<sub>дл</sub>; 1983, 1984 гг. – тонкие коричневые стрелки – T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> и T<sub>5</sub>; 1993 г. – толстые фиолетовые стрелки – T<sub>I</sub> и T<sub>II</sub> и 2008 г. – черные стрелки – T<sub>уч</sub>.

### 2.3. Выделение периодичностей в динамике извержений Ключевского вулкана с использованием вулканического дрожания

Вулканическое дрожание – один из наиболее устойчиво регистрируемых эффектов базальтовых извержений, является разновидностью вулканических землетрясений и обусловлено эруптивной деятельностью вулкана. Вулканическое дрожание представляет собой непрерывное сейсмическое колебание грунта вблизи активных вулканических построек. Его основные черты: продолжительность колебаний значительно большая, чем при других землетрясениях, постоянство (или незначительные вариации) амплитуд и периодов колебаний на протяжении большого промежутка времени.

При рассмотрении многообразных форм вулканического дрожания [Гордеев, Феофилактов, Чебров, 1978] установлено, что существует тип вулканического дрожания, которое наблюдается при извержениях базальтовых вулканов. Именно этот “базальтовый” тип низкочастотного (частота колебаний – 0,15–3,0 Гц) непрерывного гармонического дрожания, проявляющегося при

извержениях Ключевского вулкана, является предметом рассмотрения настоящей главы.

Проведено сопоставление данных по вулканическому дрожанию с результатами исследования разномасштабных эруптивных процессов (отдельные взрывы [Токарев, Гордеев, Фарберов, 1984], кратковременный (10 мин) эпизод извержения [Фирстов, 2003], этапы двухмесячного извержения [Конов, Озеров, 1988; Озеров, 1993], общий ход извержения, продолжавшегося 0,5 года [Жаринов и др., 1988]). Анализ этих данных наглядно демонстрирует, что вариации уровня вулканического дрожания хорошо коррелируют с изменениями в эксплозивной активности Ключевского вулкана.

Специально для выделения периодичностей в динамике извержений Ключевского вулкана был разработан новый метод изучения вулканического дрожания – метод эквидистантного поинтервального отсчета [Конов, Озеров, 1988]. Для исследования вулканического дрожания эта методика применялась впервые. Она включала себя: 1 – измерение максимальной амплитуды ( $A_{max}$ ) вулканического дрожания, 2 – проведение измерений по одному сейсмическому каналу – вертикальному, 3 – отказ от измерения периода на первичных записях дрожания, основывающийся на квазистационарности вулканического дрожания (постоянстве формы спектров вне зависимости от интенсивности извержения), 4 – аппроксимацию большого количества цугов дрожания в пределах короткого интервала сейсмической записи одним синусоидальным колебанием с максимальной амплитудой, 5 – эквидистантный отсчет данных, необходимый для статистической обработки дрожания, обеспечивающийся одинаковыми расстояниями между интервалами аппроксимации, 6 – переменность шага эквидистантного отсчета и длины интервала аппроксимации (от шага 15 мин и интервала 1 мин до шага 10 с и интервала 10 с) в зависимости от задачи исследования – длины выделяемого периода, 7 – выделение периодов в широком диапазоне их значений – от минимального – 40 с до максимального – 50 ч.

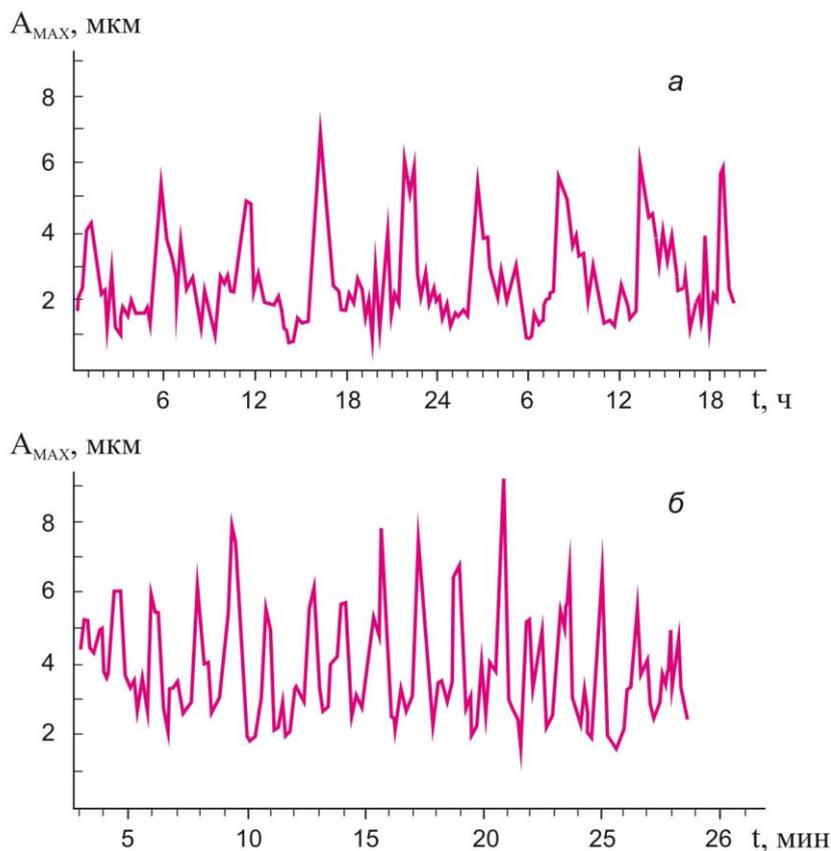
Исходный фактический материал по вулканическому дрожанию был получен на региональных сейсмических станциях Ключевской сети сейсмических наблюдений во время извержений Ключевского вулкана 1978–2008 гг. В разные годы сеть принадлежала разным организациям: Институту вулканологии АН СССР, Опытнометодической сейсмологической партии РАН и Камчатскому филиалу Геофизической службы РАН.

Аналитические данные были получены при изучении вулканического дрожания во время шести вершинных извержений: 1978, 1983, 1984, 1993, 2007 и 2008 гг. Для выделения общих периодических закономерностей в динамике извержений для начала представим данные по вулканическому дрожанию 1983–1984 гг., затем рассмотрим конкретные вулканические периодичности (пульсирующее фонтанирование, стромболианские взрывы, периодическое фонтанирование) по материалам 1978, 1993, 2007 и 2008 гг. и данным режимных вулканологических наблюдений.

По разработанной методике эквидистантного поинтервального отсчета были получены ряды максимальной амплитуды вулканического дрожания ( $A_{max}$ ), минимальный шаг измерения 10 с, максимальный – 15 мин; длина рядов составляла от 240 до 6624 точек. Эти ряды явились исходными для последующей статистической обработки на ЭВМ ЕС-1033 по программе анализа временных рядов.

В дальнейшем при выявлении периодичностей использовались табличные данные, расчет автокорреляционных функций (автокорреллограммы), функций взаимной корреляции двух случайных процессов (кросскорреллограммы). Спектральные оценки проводились по методу максимальной энтропии.

В некоторых случаях периодичность можно увидеть на графиках исходных рядов (рис. 2-02), но такая наглядная картина, к сожалению, редка, и детальное изучение периодов возможно лишь методами статистической обработки.



**Рис. 2-02.** Графики изменения максимальной амплитуды ( $A_{MAX}$ ) вулканического дрожания для интервалов времени 1984 г.: а – 00 ч 14 августа – 20 ч 15 августа (шаг измерения – 15 мин) и б – 03 ч 03 мин – 03 ч 29 мин 23 июля (шаг измерения – 10 с).

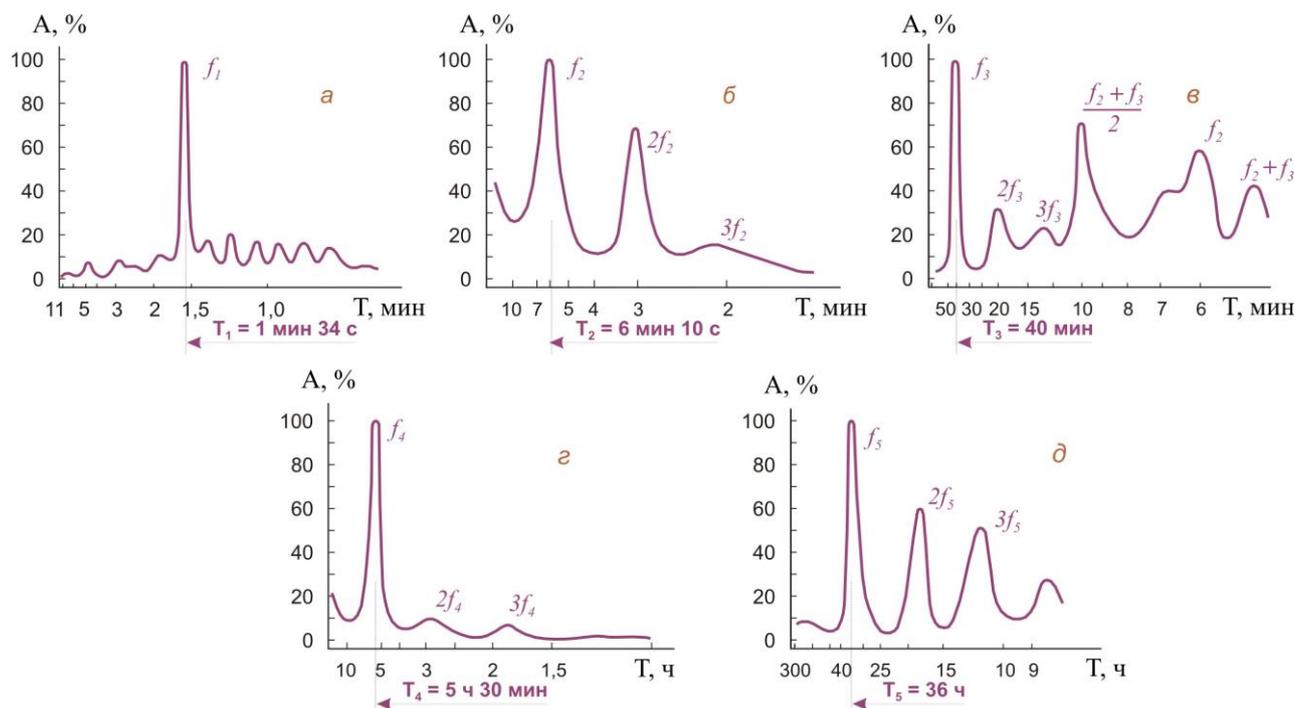
По оси ординат – максимальная амплитуда вулканического дрожания,  $A_{MAX}$ , мкм; по оси абсцисс – время: а –  $t$ , ч; б –  $t$ , мин.

Хорошо выражены пульсации амплитуды вулканического дрожания с периодами 5 ч 30 мин (а) и 1 мин 34 с (б).

По результатам комплексной обработки исходных рядов низкочастотного вулканического дрожания в ходе извержений Ключевского вулкана 1983–1984 гг. в диапазоне частот от  $5,6 \cdot 10^{-6}$  Гц ( $T_{max}$  – 50 ч) до  $2,5 \cdot 10^{-2}$  Гц ( $T_{min}$  – 40 с) выделено 47 пиков (частот). Этот набор сохраняется на протяжении всего изученного времени 1983–1984 гг. – 1 год и 7 месяцев. Наблюдаемое во времени изменение картины спектров и резкое возбуждение тех или иных частот позволило выделить 5 основных частот (в скобках приведены соответствующие им периоды):  $1,1 \cdot 10^{-2}$  Гц ( $T_1 = 1$  мин 34 с),  $2,5 \cdot 10^{-3}$  Гц ( $T_2 = 6$  мин 10 с),  $4,2 \cdot 10^{-4}$  Гц ( $T_3 = 40$  мин),  $5,1 \cdot 10^{-5}$  Гц ( $T_4 = 5$  ч 30 мин),  $7,7 \cdot 10^{-6}$  Гц ( $T_5 = 36$  ч) (рис. 2-03).

Сопоставление периодичностей вулканического дрожания 1983–1984 гг. с периодичностями прошлых лет – 1932–1984 гг. (рис. 2-01) показывает, что четыре основных периода –  $T_1$  –  $T_4$  хорошо согласуются с 4-мя группами периодов, выделенных в историческом обзоре:  $T_1$  и  $T_2$  входят во вторую группу периодов исторического обзора (1,5 – 6 мин.),  $T_3$  – в третью (35–40 мин),  $T_4$  вместе со своими гармониками – в четвертую группу (1,5 – 7 ч.). 36-часовая периодичность ( $T_5$ ) в извержениях прошлых лет не отмечалась. Трудно ожидать выделение такой длительной периодичности по визуальным данным. В то же время не удалось выделить на спектрах вулканического дрожания 1984 г. частоту, соответствующую

15-минутному пику, который фиксировался на гистограмме распределения периодов прошлых лет.



**Рис. 2-03.** Спектры огибающей амплитуды вулканического дрожания для интервалов времени 1984 г.: а – 03 – 04 ч 23 июня, б – 01–02 ч 23 августа, в – 15–19 ч 25 июня, г – 00 ч 14 августа – 01 ч 16 августа и д – 19 июня – 2 июля.

По оси ординат – относительная спектральная плотность, А, %. По оси абсцисс – длина периода: на рис. а и б – Т, мин; на рис. в, г, д – Т, ч.

Кроме периодов  $T_1 - T_5$ , в составляющей вулканического дрожания основного ряда 1984 г. были выявлены периодичности, которые обусловлены лунно-солнечным приливным деформирующим процессом. Они выделены с помощью кросс-корреляционных функций, связывающих ряды поправок на приливное изменение силы тяжести ( $\Delta g$ ) и соответствующие им по времени ряды значений огибающей амплитуды вулканического дрожания – для трех интервалов времени. Значения  $\Delta g$ , измеряемые в миллигалах, предварительно снимались с графика с отсчетом в 1 час. Хорошо выраженные на кросс-коррелограммах 12- и 24-часовые периодические изменения коэффициентов корреляции свидетельствуют о воздействии на динамику извержения приливных деформирующих процессов. Такие же периодичности отмечены и при анализе исторических извержений 1932–1984 гг.

#### 2.4. Три группы периодичностей в эруптивной деятельности Ключевского вулкана

В предыдущем разделе было показано, что важной составляющей динамики извержений Ключевского вулкана являются периодические процессы. Они проявляются на разных временных диапазонах и, как было установлено, связаны с разными проявлениями эруптивной активности. Анализ вулканологических и сейсмологических данных позволил выделить из наблюдаемых периодов колебаний три основные группы, принадлежащие к разным временным интервалам: секунды (пульсирующее фонтанирование), минуты – десятки минут (стромболианские взрывы) и часы (периодическое фонтанирование). Охарактеризуем более детально эти три группы периодичностей.

#### 2.4.1. Периодичность пульсирующего фонтанирования

Изучение литературных источников за 1932–1984 гг. и детальные наблюдения за периодичностью с секундным интервалом, выполненные автором во время побочного извержения 1983 г. и вершинного извержения 1984 г., позволили выделить новый тип вулканической деятельности – пульсирующее фонтанирование. Использование данных региональных сейсмических станций, расположенных на расстояниях 14 км и более от места извержения и регистрирующих низкочастотное вулканическое дрожание, не позволяет выделить периодические флуктуации пульсирующего фонтанирования из-за ослабления, рассеяния и преломления сейсмического сигнала.

Наблюдения показали, что пульсирующее фонтанирование не является следствием внешних аэродинамических преобразований, как это часто происходит в газопепловой колонне. Периодические импульсы начинались непосредственно от кромки кратера, то есть процесс пульсирующего фонтанирования является следствием эндогенного структурирования в поднимающейся магматической колонне.

Пульсирующее фонтанирование – это ритмичный процесс резкого, кратковременного усиления интенсивности фонтанирования раскаленных бомб, наблюдаемый в динамике струи, по которой через короткие секундные интервалы снизу вверх проскакивает более плотная, более яркая, более интенсивная порция бомб. Последовательное чередование порций обеспечивает повторяющийся пульсирующий процесс с периодом, установленным в разные годы, от 0,66 до 5 с (см. [рис. 2-01](#)). Пульсирующее фонтанирование осуществляется в широком диапазоне интенсивности извержений при высоте выброса бомб от 80 до 800 м. Оно возникает во время вершинных и побочных извержений, может происходить при одновременном излиянии лавовых потоков, но может происходить и без них. Пульсирующее фонтанирование, обычно существующее десятки секунд, минуты, десятки минут, может сменяться равномерным фонтанированием и возникать снова через некоторое время.

Описываемые импульсы усиливают интенсивность фонтанирования – раскаленные бомбы вылетают выше и разлетаются дальше. Временная последовательность импульсов создает пульсирующий режим. Автор предложил для нового режима использовать термин “пульсирующее фонтанирование”.

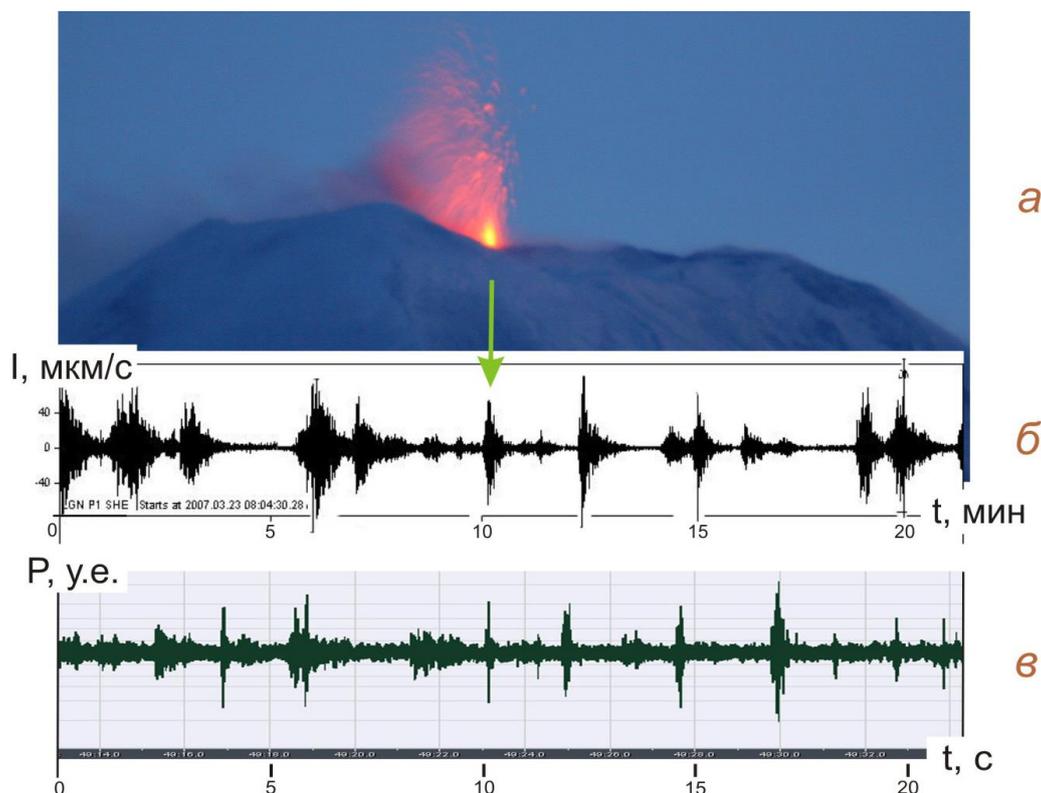
Механизм пульсирующего фонтанирования в литературе не описан, его обсуждение будет проведено в Главе 4 настоящей работы.

#### 2.4.2. Периодичность стромболианских взрывов

Ритмичность вулканических выбросов/взрывов – стромболианский тип извержения – описана для многих базальтовых вулканов мира. Несмотря на то, что термину “стромболианское извержение” более 100 лет, до настоящего времени нет определения, дающего полное представление об этом явлении. Проведенные исследования позволили показать характеристики стромболианской активности в извержениях Ключевского вулкана. Продемонстрируем их на примере конкретного события.

На [рис. 2-04](#) представлены две стороны одного и того же взрыва: его внешнее проявление – трассы бомб (**а**) и внутреннее – сейсмический отклик среды (**б**) [[Ozerov, 2009](#)]. На фотографии – светящиеся трассы раскаленных бомб,

выброшенных стромболианским взрывом на высоту 230 м (рис. 2-04 а). Подсчет количества светящихся трасс, пиксельный анализ размеров выброшенных бомб, учет плотности пирокластического материала показали, что этот взрыв вынес на поверхность ~ 32 т раскаленных пород.



**Рис. 2-04.** Сопоставление взрывной активности в вершинном кратере Ключевского вулкана с характером проявления снарядного режима в экспериментах на КАМБИ, по [Ozerov, 2009].

а – взрыв в кратере 23 марта 2007 г. Высота выброса бомб 230 м, объем ~ 30 т;

б – фрагмент сейсмической записи взрывной активности 23 марта 2007 г. По оси ординат – интенсивность вулканического дрожания,  $I$ , мкм/с; по оси абсцисс – время,  $t$ , мин. Регистрация проводилась на расстоянии 3,85 км от кратера. Зеленой стрелкой указано сейсмическое событие, сопровождающее взрыв;

в – фрагмент акустической записи всплесков снарядного режима модельной жидкости на верхнем уресе экспериментальной колонны КАМБИ; по оси абсцисс – время,  $t$ , с, по оси ординат – давление звуковой волны,  $P$ , у.е.

Сейсмограмма (рис. 2-04 б) отображает динамику стромболианских взрывов. За время наблюдений (21 мин) произошло 10 сильных сейсмических событий. Хорошо видно, что они имеют разные амплитуды, продолжительности и характеристики вступления. Интервалы между взрывами отличаются по продолжительности и по интенсивности сигнала – в одних случаях уровень сигнала опускается до фонового значения, а в других – между взрывами наблюдаются слабые сейсмические события.

Анализ аналогичных материалов в совокупности с данными исторического обзора 1932–1984 гг. (рис. 2-01) и данными по выделению периодичностей с использованием вулканического дрожания 1983–1984 гг. позволяют составить представление о типе стромболианской активности на Ключевском вулкане.

Стромболианские взрывы – выбросы раскаленных вулканических бомб в виде веера или вертикального султана на высоту десятки–сотни метров. Могут

сопровождаться выносом пепла. Взрывы обычно кратковременны: продолжительность активной фазы взрыва – секунды–десятки секунд. После фазы покоя (десятки секунд–минуты–десятки минут) происходит новый взрыв и т.д. Наблюдается дискретный, квазипериодический, разноамплитудный процесс, в котором отдельные взрывы могут отличаться как по характеру начальной фазы, так и по продолжительности. Для стромболианских взрывов выявлен набор периодичностей, проявляющийся в интервале от 20 с до 20 мин (см. **рис. 2-01**). Для Ключевского вулкана наиболее характерна 5-минутная периодичность, хорошо выражены 2-минутная и 15-минутная. Слабые стромболианские взрывы выносят на поверхность до 10 тонн магматических продуктов, средние – 10–100 тонн, а сильные – более 100 тонн. Взрывная активность может сопровождаться одновременным излиянием лавовых потоков или происходить без них.

Рассматривать природу извержений стромболианского типа с позиции гидродинамики двухфазных смесей впервые предложил [Дрознин, 1969, 1980]. Для физического моделирования процессов формирования крупных газовых снарядов созданы две конструктивно разные газогидродинамические лабораторные установки: барьерный накопитель-дозатор [Vergniolle, Jaupart, 1985; Jaupart, Vergniolle, 1987] и Комплекс Аппаратуры Моделирования Базальтовых Извержений (КАМБИ) [Озеров, 2007, 2010; Ozerov, 2009]. На этих установках реализованы разные принципы получения дискретных газожидкостных режимов. Обсуждение этих работ проведено в главах 3 и 4.

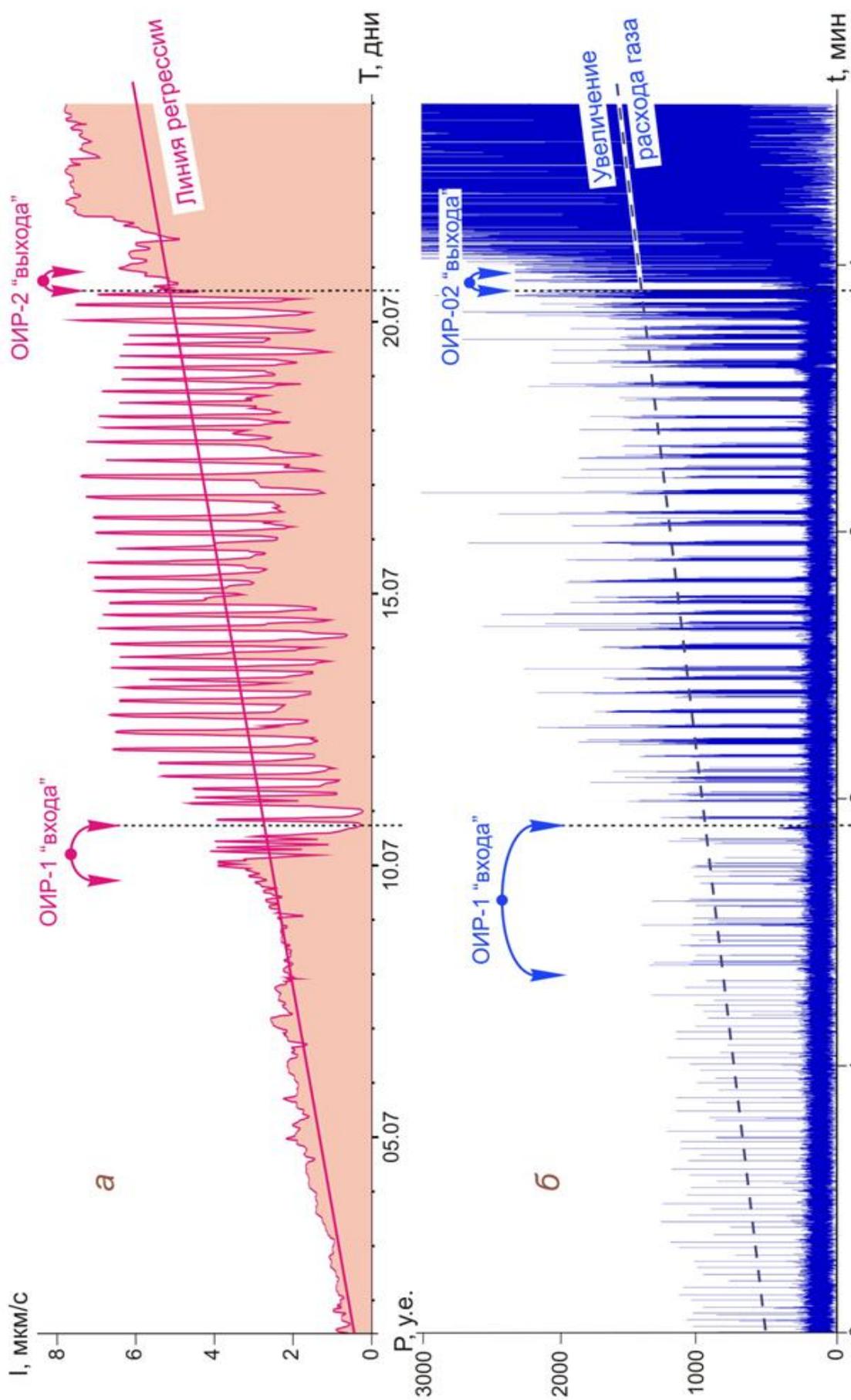
#### 2.4.3. Периодичность в динамике фонтанирования

Описаний периодического фонтанирования в научной литературе нет. С 1984 г. нами проводятся вулканологические и геофизические (вулканическое дрожание) исследования, которые впервые на базальтовых вулканах позволили установить явление устойчивого периодического фонтанирования, проявляющегося в широком временном диапазоне – от 1 ч 30 мин до 8 ч [Ozerov, Konov, 1987, 1988; Конов, Озеров, 1988, Ozerov, Firstov, Gavrilov, 2007].

Для выделения основных характеристик рассматриваемого явления было проведено детальное исследование вулканического дрожания трех вершинных извержений Ключевского вулкана 1984, 1993 и 2008 гг. Динамика этих извержений изучалась автором. Дополнительно были привлечены сейсмические данные по вулканическому дрожанию 1984 г., полученные при помощи автономных сейсмических станций с регистрацией на магнитную ленту [Гордеев и др., 1986].

Для трех рассмотренных извержений установлены общие закономерности. Рассмотрим их на примере извержения 1993 г. (**рис. 2-05**). На фоне общего повышения интенсивности вулканического дрожания последовательно проявились три режима: равномерного повышения – низкоинтенсивный (2–10 июля), периодический (40 колебаний за 10 суток с периодом ~ 6 ч 12 мин) и равномерный – высокоинтенсивный (23–24 июля). На графике хорошо выделяются две области изменения режимов (ОИР), где извергающаяся система приобретает новые качества. Смена режимов в двух ОИР происходит на фоне общего повышения уровня вулканического дрожания, но в одном случае система «входит» в периодический режим, а во втором «выходит» из него, поэтому это принципиально разные ОИР. Поскольку описанные области ограничивают амплитудный интервал проявления периодического режима, есть основание полагать, что они являются

нижней (~ 3 мкм/с) и верхней (~ 5,2 мкм/с) амплитудными границами интенсивности вулканического дрожания, в пределах которых может существовать периодический



**Рис. 2-05.** Сопоставление характера эксплозивной активности Ключевского вулкана (1993 г.) с поверхностными проявлениями газогидродинамических режимов – по результатам экспериментальных исследований на КАМБИ, [Озеров, 2012].  
 а – график изменения интенсивности вулканического дрожания Ключевского вулкана для интервала времени 1 июня – 24 июля 1993 г. [Ozerov, Firstov, Gavrilov, 2007]; по оси ординат – интенсивность вулканического дрожания,  $I$ ,  $\mu\text{m/s}$ ; по оси абсцисс – время,  $T$ , сутки;  
 б – график изменения давления звуковой волны, производимой лопающимися пузырями над поверхностью модельной жидкости – по результатам экспериментальных исследований на КАМБИ; по оси ординат – давление звуковой волны в условных единицах,  $P$ ,  $\text{u.e.}$ , по оси абсцисс – время,  $t$ , мин. Ось ординат по вертикали – искусственно ограничена выше значения 3 000  $\text{u.e.}$ , по [Озеров, 2011].  
 OIP – область изменения режима.

режим. Процесс периодического фонтанирования является закономерной составляющей более крупной эруптивной последовательности и проявляется на фоне общего повышения интенсивности эруптивного процесса между двумя режимами – равномерным низкоинтенсивным и равномерным высокоинтенсивным.

Важно отметить, что период не является фиксированной величиной и может «растягиваться» или «сжиматься» в пределах интервала проявления периодического режима. Период фонтанирования в 1984 г. составил ~ 5 ч 30 мин, в 1993 г. ~ 6 ч и в 2008 г. изменялся от 5 ч до 1 ч 30 мин. В трех рассмотренных случаях он попадает в третью основную группу “периодического фонтанирования”, выделенную по данным исторического обзора, см. **рис. 2-01**.

Геологический эффект периодического фонтанирования определяется выбросом большого количества пирокластического материала. Выполнен анализ строения шлакового конуса М (*Меняйлова*), расположенного на склоне Ключевского вулкана. В строении конуса выделено 15 слоев, мощность каждого ~ 2 м. Более плотная часть слоя состоит из крупных вулканических бомб, а более рыхлая – сложена мелкими бомбами и вулканическим пеплом. Последовательное чередование слоев создает пирокластическую толщу с периодически повторяющейся структурой. Шлаковый конус является моногенным образованием, таким образом, слоистая толща сформировалась в ходе одного извержения, во время которого существовали фазы усиления (крупные бомбы) и ослабления (более мелкая фракция), закономерно сменяющие друг друга. Слоистость в строении шлаковых конусов Ключевского вулкана также установлена на конусах Е (*Цирк*), Лепешка и Заварицкого. Мощность слоев варьирует от десятков сантиметров до нескольких метров.

Особенности периодического фонтанирования и слоистость строения шлаковых конусов – закономерные следствия одного и того же глубинного магматического процесса, являющегося источником периодического поступления крупных объемов тefры на поверхность.

Периодическое фонтанирование – последовательное чередование фаз интенсивного фонтанирования раскаленных бомб и фаз значительного ослабления или прекращения деятельности огненных фонтанов. Фазы усиления и ослабления последовательно сменяют друг друга, формируя периодический процесс, который в ходе одного извержения может продолжаться от 1 до 10 суток. Продолжительность активной фазы от десятков мин до 1 ч. Фазы ослабления обычно более продолжительные. Набор периодичностей, установленный для исследуемого процесса, проявляется от 1 ч 30 мин до 8 ч. Во время активной фазы раскаленные вулканические бомбы выбрасываются на высоту 150–800 м, которая меняется в зависимости от интенсивности извержения. Во время фаз усиления обычно формируются пепловые облака. Периодическое фонтанирование наблюдается во время вершинных и побочных извержений, оно может сопровождаться излиянием лавовых потоков, но может происходить и без них. Базальтовые шлаковые конусы имеют слоистую структуру, свидетельствующую о периодичности фонтанирования базальтовых магм. При фонтанировании слабой интенсивности на поверхность земли поступает менее 10 тонн/с магматических продуктов, средней – 10–100 тонн/с и сильной – более 100 тонн/с.

Защищаемое положение Главы 2 – см. Введение, стр. 5.

### Глава 3

## КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ (КАМБИ) И ПРЕДПОСЫЛКИ ЕГО СОЗДАНИЯ

Цель работы – создание принципиально новой экспериментальной аппаратуры для выявления, моделирования и изучения механизмов пульсирующего фонтанирования, стромболианских взрывов и периодического фонтанирования при извержениях базальтовых вулканов.

Основной метод – разработка общей концепции экспериментальной аппаратуры, проектирование, изготовление механических и электронных узлов. Монтаж экспериментального комплекса, тестовые испытания, заключительная отладка и запуск в эксплуатацию.

Назначение экспериментальной установки – экспериментальное моделирование газогидродинамических процессов в магматическом потоке во время подъема по подводящему каналу вулкана (экспериментальная колонна) и периодических эксплозивных эффектов извержений в кратере вулкана (верхний срез колонны).

В качестве природного объекта исследований выбран типичный представитель базальтового, андезибазальтового вулканизма – Ключевской вулкан, где широко проявлены периодические процессы.

В настоящее время для понимания процессов, происходящих в подводящих системах базальтовых вулканов, используются законы движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах. Первое системное исследование режимов течения двухфазных смесей в вертикальных трубах было представлено в работе [Козлов, 1954], в которой установлено четыре основных режима течения двухфазных смесей – пузырьковый, пробковый (снарядный), эмульсионный (смешанный) и пленочный (кольцевой).

Прямое сопоставление этих режимов с типами вулканических извержений, проведенное в работах [Дрознин, 1969, 1980], показало, что конкретный тип извержения должен быть связан с определенным газогидродинамическим режимом.

В настоящее время для объяснения особенностей динамики извержений вулканологи фактически используют четыре газогидродинамических режима в вертикальных трубах. За 60 лет, с момента открытия этих режимов [Козлов, 1954], представления о процессах движения двухфазных смесей в вертикальных трубах фактически не изменились. Не было выполнено принципиально новых разработок, не было открыто ни одного нового режима течения, поэтому вулканологи вынуждены использовать газогидродинамические режимы практически в «первозданном» виде. Это не позволяет корректно интерпретировать результаты вулканологических наблюдений и геофизические данные, полученные во время извержений при помощи современной аппаратуры.

Для физического моделирования периодических процессов, выявленных в динамике извержений Ключевского вулкана, была сконструирована специальная лабораторная установка КАМБИ [Озеров, 2007, 2010, 2011, 2012].

### Комплекс аппаратуры для моделирования базальтовых извержений – КАМБИ

КАМБИ предназначен для всестороннего моделирования эффектов, возникающих при движении двухфазных модельных жидкостей по протяженным вертикальным колоннам; исследования режимов, возникающих в двухфазных

смесях, их динамики и проявления каждого отдельного режима на поверхности; особое внимание уделялось поиску природы периодических режимов извержений, описанных в **Главе 2**.

#### Основные принципы конструирования лабораторной установки

Природным прообразом установки является Ключевской вулкан – его питающая система, магматическое вещество, динамические характеристики извержений. Приведем основные положения, которыми руководствовался автор при конструировании лабораторной установки: 1 – высота питающего канала в сотни тысяч раз больше его диаметра; 2 – равномерное поступление однородной магмы в овальный вертикальный подводный канал; 3 – расплав, поступающий в нижнюю часть подводного канала, однородный и не содержит свободной газовой фазы; 4 – при подъеме магмы по каналу, вследствие снижения давления, происходит образование пузырьков (нуклеация) и их последующий рост; 5 – реологические свойства магмы таковы, что газовые пузырьки движутся существенно быстрее жидкой фазы; 6 – в верхней части канала отсутствуют запирающие пробки из затвердевшего магматического вещества, способные повлиять на поведение двухфазного потока при выходе его на поверхность – система открытая.

#### Технические характеристики КАМБИ

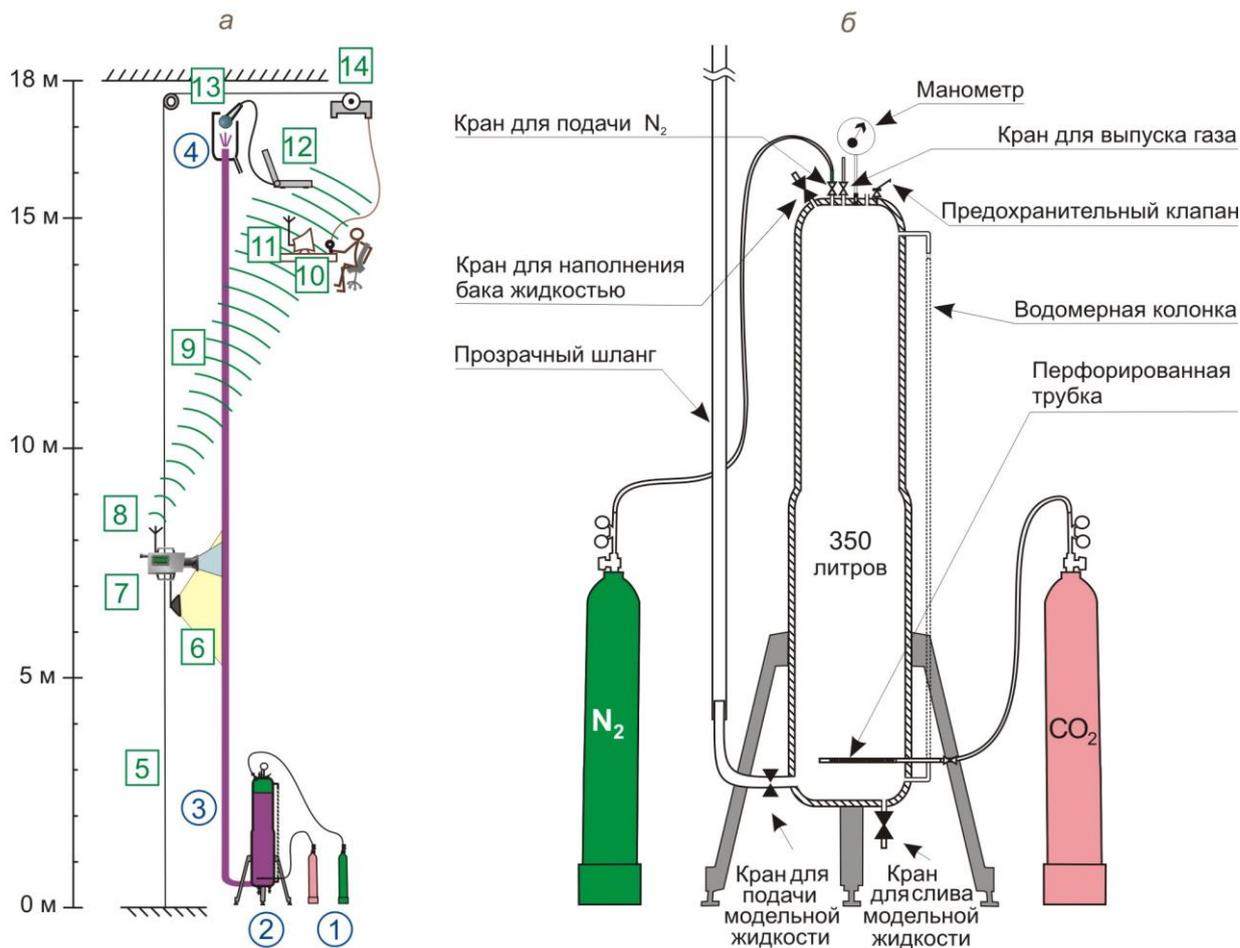
Работа по созданию экспериментальной установки была начата нами в 2003 году. За последующие пять лет было сконструировано девять экспериментальных газогидродинамических установок. В итоге был создан комплекс аппаратуры для моделирования базальтовых извержений – КАМБИ и проведены серии лабораторных экспериментальных работ.

КАМБИ смонтирован в здании Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, его общая высота – 18,7 м. Установка состоит из двух систем – моделирующей и регистрирующей. Идея, расчеты, изготовление всех узлов и монтаж КАМБИ осуществлены коллективом сотрудников Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН под руководством автора.

#### Моделирующая система КАМБИ

КАМБИ сконструирован таким образом, что его моделирующая система может работать в двух вариантах: газонасыщенной колонны – в трубу подается модельная жидкость с растворенным газом (**рис. 3-01**) и барботажной колонны – в трубу с неподвижной жидкостью через капилляр извне вводится газ, за счет чего в жидкости формируются пузырьки (**рис. 3-02**).

Моделирующая система в варианте газонасыщенной колонны (**рис. 3-01 а, б**) включает герметичный бак для приготовления газонасыщенной модельной жидкости – *магматический очаг*; три прозрачные колонны ( $\varnothing_{\text{внутр}}$  – 18 мм, 25 мм и 50 мм; высота – 16,6 м) – *питающий канал*; прозрачную емкость для приема поступающей модельной жидкости – *кратерную область/жерло* и модельную жидкость – *жидкое магматическое вещество*. В работе в качестве модельной жидкости используется вода с растворенным в ней газом CO<sub>2</sub> и азот, выполняющий роль поршня, выдавливающего модельную жидкость из бака в экспериментальные колонны.



**Рис. 3-01.** Комплекс аппаратуры для моделирования базальтовых извержений (КАМБИ) в варианте "газонасыщенная колонна".

а – схема моделирующей (1–4, синие кружки) и регистрирующей (5–14, зеленые квадраты) систем КАМБИ: 1 – газовые баллоны высокого давления с  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ ; 2 – герметичный бак для приготовления модельной жидкости; 3 – прозрачная колонна; 4 – прозрачная емкость для приема жидкости; 5 – трос, направляющий движение платформы динамического видеослежения; 6 – источник света; 7 – видеокамера; 8 – передатчик и телеметрическая антенна; 9 – радиосигнал; 10 – пульт управления, отвечающий за перемещение видеокамеры; 11 – приемник видеосигнала и монитор; 12 – компьютер; 13 – микрофон; 14 – электродвигатель. В верхней части рисунка – исследователь-оператор, управляющий движением видеокамеры.

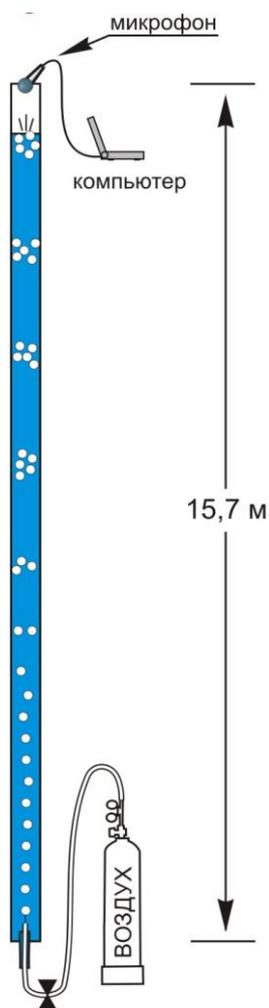
б – блок для приготовления газонасыщенной модельной жидкости и подачи ее в прозрачную вертикальную колонну.

Моделирующая система в варианте барботажной колонны (рис. 3-02) включает регулятор подачи газа, формирующего двухфазный поток, прозрачную колонну ( $\text{Ø}_{\text{внутр}} = 18 \text{ мм}$ ; высота – 15,7 м) – *питающий канал*, емкость для приема поступающей модельной жидкости – *кратерную область/жерло* и модельную жидкость – *жидкое магматическое вещество*.

В барботажном варианте моделирующая система лишена "очаговой зоны", этап нуклеации пузырьков отсутствует. Однако можно наблюдать поведение газовых пузырьков неподвижной жидкости и исследовать влияние расхода газа на характер двухфазного потока.

В качестве модельной жидкости применяется 35% раствор глицерина в дистиллированной воде, в качестве барботирующего газа – воздух, поступающий в колонну под давлением из газового баллона.

Методика проведения экспериментальных исследований и результаты моделирования изложены в **Главе 4**.



**Рис. 3-02.** Схема моделирующей системы (КАМБИ) в варианте "барботажная колонна".

1 – газовый баллон высокого давления с воздухом; 2 – газовый кран тонкой регулировки; 3 – прозрачная колонна; 4 – прозрачная емкость для приема жидкости.

### Регистрирующая система КАМБИ

Регистрирующая система контролирует параметры двух моделирующих систем – в газонасыщенной колонне и барботажной колоннах.

Регистрирующая система включает систему динамического видеослежения, электронный высотомер и спидометр, блок видеорегистрации, блок акустической регистрации, синхронизирующее устройство и отключающую систему (рис. 3-01 а).

Подводя итог техническому описанию, подчеркнем главные конструктивные особенности КАМБИ, которые принципиально отличают ее от других существующих установок вертикального газогидродинамического моделирования.

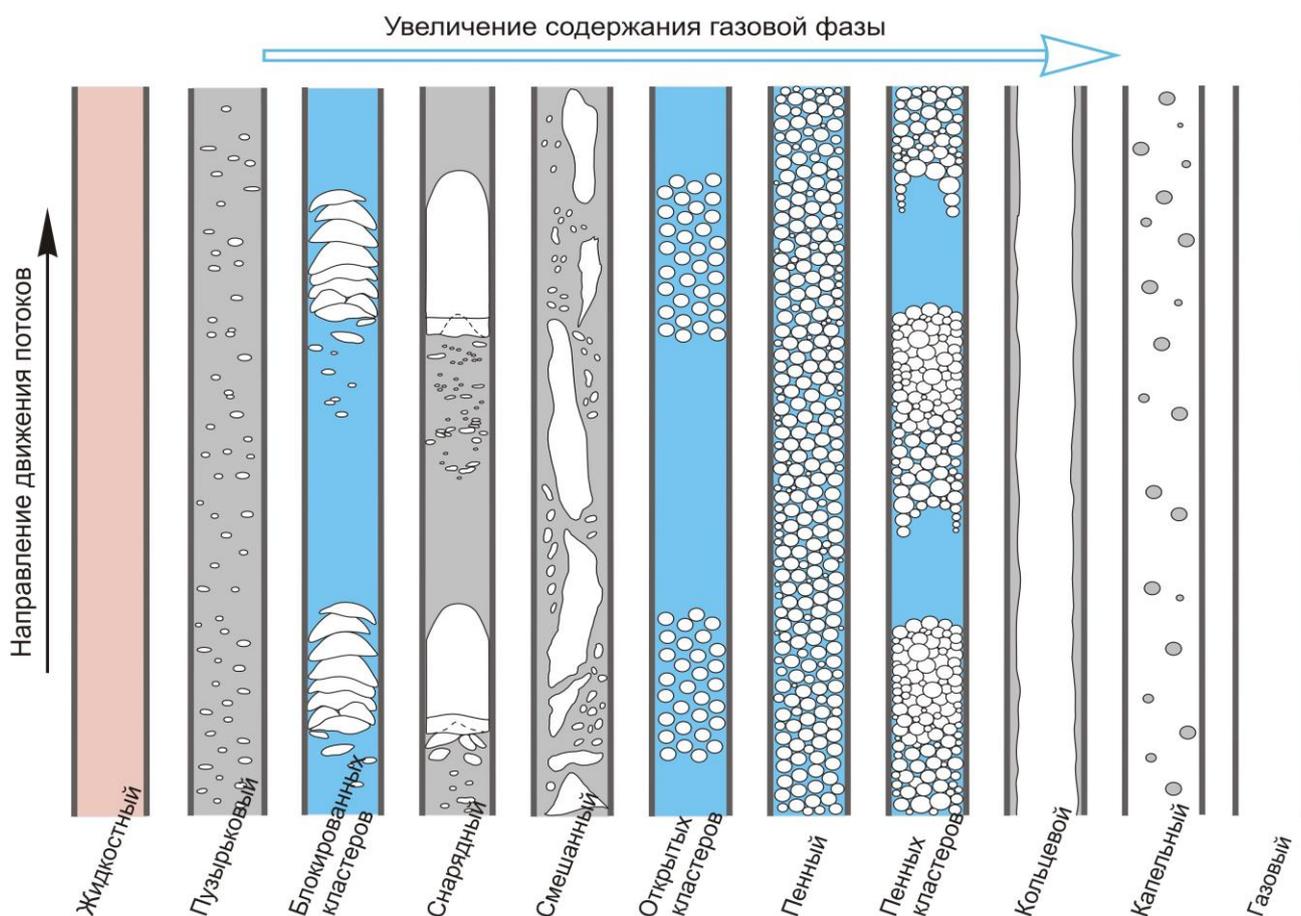
1. В мире нет ни одной установки, работающей с газонасыщенными модельными жидкостями. Обычно используют либо барботажный вариант (газ пробулькивает сквозь жидкость), либо газ под большим давлением продувается сквозь жидкость.

2. КАМБИ имеет самые протяженные прозрачные колонны – 16,6 м, в то время как самая длинная прозрачная колонна на других установках, предназначенных для изучения новых газогидродинамических режимов, имеет длину 5 м.

3. Ни одна экспериментальная установка вертикального газо-жидкостного моделирования не имеет системы динамического видеослежения, которая позволяет проводить непрерывное сопровождение и получать видеозапись движения любого пузырька (группы пузырьков) по всей длине экспериментальной колонны.

### Новая схема режимов течения двухфазных смесей в вертикальных колоннах

Результаты экспериментов на КАМБИ существенно дополняют газогидродинамические данные, на которых базируется современное моделирование динамики извержений базальтовых вулканов. До наших работ было известно 5 режимов течения двухфазных смесей в вертикальных трубах – пузырьковый, снарядный, смешанный, кольцевой и капельный [Козлов, 1954б; Taitel, Barnea, Dukler, 1980]. На схеме рис. 3-03 они представлены в традиционном черно-белом исполнении. В процессе исследований на КАМБИ было установлено еще 4 режима – пенный, пенных кластеров [Озеров, 2013], блокированных кластеров [Ozerov, 2009] и открытых кластеров [Озеров, 2011]. На схеме они приведены синим цветом.



**Рис. 3-03.** Новая схема режимов течения двухфазных смесей в вертикальных колоннах. В нижней части схемы – названия режимов, представленных в колоннах.

Кроме того, газогидродинамическая схема вертикальных колонн дополнена автором еще двумя режимами – жидкостным и газовым. *Жидкостный режим* в канале вулкана соответствует спокойному излиянию жидкой лавы в кратере, когда пепел и бомбы отсутствуют – “лавовое извержение” [Влодавец, 1984]. Такой тип извержения наблюдался нами во время извержения вулкана Ключевской (1988 г.). *Газовый режим* в канале соответствует в жерле вулкана интенсивной раскаленной газовой струе ( $T \geq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) без пепла и выбросов твердых или пластичных магматических продуктов – “газовое извержение” [Макдональд, 1975; Влодавец, 1984]. Этот тип извержения был явно выражен во время извержения вулкана Горелый (2011–2013 гг.). На схеме **рис. 3-03** жидкостный режим представлен розовым цветом, а газовый – белым.

В итоге, получена новая схема газогидродинамических режимов в вертикальных колоннах (**рис. 3-03**). Приведено 11 режимов, которые значительно отличаются друг от друга. Режимы представлены в последовательности увеличения содержания газовой фазы (слева направо). Новая схема режимов значительно расширяет возможности моделирования вулканических процессов.

Описанию работ по моделированию конкретных типов извержений посвящена следующая глава.

Защищаемое положение Главы 3 – см. Введение, стр. 5.

## Глава 4

# МЕХАНИЗМЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ФОНТАНИРОВАНИЯ, СТРОМБОЛИАНСКИХ ВЗРЫВОВ И ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Цель исследований – изучение физических процессов, обеспечивающих формирование в подводящем канале вулкана газовых структур, определяющих возникновение в кратере режимов пульсирующего фонтанирования, стромболианских взрывов и периодического фонтанирования.

Основной метод – экспериментальное газогидродинамическое моделирование процесса движения двухфазных смесей в вертикальных колоннах КАМБИ и сопоставление полученных данных с реальными вулканическими процессами.

Объект моделирования – динамические процессы, происходящие в магматическом потоке во время подъема по подводящему каналу вулкана (экспериментальная колонна), и периодические взрывные эффекты извержений в кратере вулкана (верхний срез экспериментальной колонны).

Особенность проведенных экспериментальных исследований заключается в сопоставлении результатов газогидродинамического моделирования с реальными природными данными: либо ярко выраженными эффектами извержений, либо с сейсмограммами, на которых четко проявлены динамические характеристики извержений. Фактически речь идет о моделировании эруптивных процессов.

Для выбора схемы моделирования (барботажная или газонасыщенная колонна, см. **рис. 3-01, 3-02**) проведено несколько циклов предварительных опытов с колоннами разного диаметра – 10, 14, 18, 25 и 50 мм. Установлено, что для получения пенного и снарядного режимов следует использовать газонасыщенные колонны, а для изучения процессов кластеризации одномерных пузырьков – барботажную колонну.

Во всех экспериментах на КАМБИ используются длинные вертикальные колонны постоянного диаметра. Отсутствуют любые неоднородности, способные влиять на движение двухфазного потока как в колоннах, так и при выходе на поверхность, система открытая.

В главе последовательно представлены эксперименты по изучению пульсирующего фонтанирования (раздел 4.1.), стромболианских взрывов (раздел 4.2.) и периодического фонтанирования (раздел 4.3.).

### 4.1. Механизм пульсирующего фонтанирования

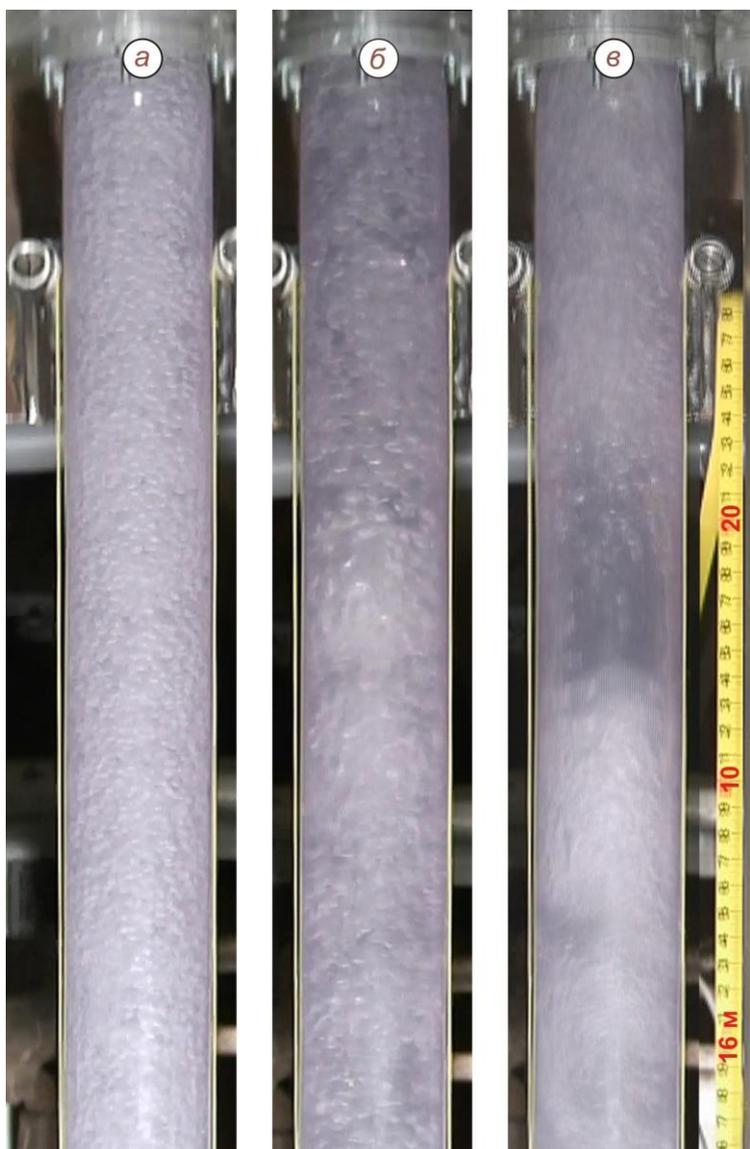
Параметры экспериментального моделирования:

газонасыщенная колонна,  $\varnothing_{внутр} = 50 \text{ мм}$ ,  $h_{колонны} = 16,6 \text{ м}$ ,  $P_{насыщения} = 1,6 \text{ атм}$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ .

**4.1.1.** При изучении движения газонасыщенной жидкости по вертикальной колонне установлено, что в зависимости от расхода модельной жидкости реализуются два варианта развития двухфазного потока: 1 – равномерный (режимы: жидкостной, пузырьковый и пенный) и 2 – периодический (режимы: жидкостной, пузырьковый и пенных кластеров).

**4.1.2.** В ходе экспериментов выявлены и описаны новые ранее неизвестные режимы течения двухфазных смесей в вертикальной колонне – пенный и пенных кластеров (**рис. 4-01**). Пенный режим представляет собой однородный поток газовых пузырьков, близко расположенных друг к другу и равномерно движущихся вверх по

колонне. Объем газовой фазы существенно превосходит объем жидкости (более 75%). Для пенного режима характерен одинаковый размер крупных пузырьков, пространство между которыми заполнено более мелкими пузырьками. Режим пенных кластеров определяется тугими сгустками пузырьков, которые последовательно движутся вверх по колонне в потоке пены на примерно одинаковом расстоянии друг от друга, создавая в потоке периодический/квазипериодический режим. Скорость движения пенных кластеров в 2–3 раза выше, чем средняя скорость пенного потока.



**Рис. 4-01.** Фрагменты газогидродинамических режимов, возникающих в верхней части вертикальной прозрачной колонны ( $\varnothing_{\text{внутр.}} = 50$  мм,  $h = 16,6$  м), при разных начальных расходах подачи модельной газонасыщенной жидкости.

**а** – режим пенный, равномерный;

**б** – режим пенных кластеров (без разрыва сплошности пенного потока), периодический;

**в** – режим пенных кластеров (с разрывом сплошности пенного потока), периодический.

Справа от колонн – желтая мерная лента, деление 1 мм.

**4.1.3.** Комплекс проведенных исследований (натурных – во время изучения извержений Ключевского вулкана и лабораторных – при изучении движения двухфазных смесей на КАМБИ) позволил предложить новую гипотезу, объясняющую разнообразие проявлений эксплозивной активности. В зависимости от типа двухфазного потока в подводящем канале вулкана, в жерле будут проявляться различные виды эксплозивной деятельности: монотонное фонтанирование бомб при равномерном пенном режиме и пульсирующее фонтанирование при режиме пенных кластеров. Таким образом, реализация многообразных эксплозивных проявлений базальтовых извержений определяется режимом течения газожидкостного магматического потока в подводящем канале вулкана.

## 4.2. Механизм стромболианских взрывов

Параметры экспериментального моделирования:

- газонасыщенная колонна,  $\varnothing_{внутр} = 18 \text{ мм}$ ,  $h_{колонны} = 16,6 \text{ м}$ ,  $P_{насыщения} = 1,6 \text{ атм.}$ ;
- барботажная колонна,  $\varnothing_{внутр} = 18 \text{ мм}$ ,  $h_{колонны} = 15,7 \text{ м}$ ,  $\varnothing_{пузырьков} \sim 2,5 \text{ мм}$ .

Основная часть исследований проведена с использованием газонасыщенной жидкости. Эксперименты в барботажной колонне проведены в небольшом объеме, лишь для сравнения с таковыми в газонасыщенной колонне.

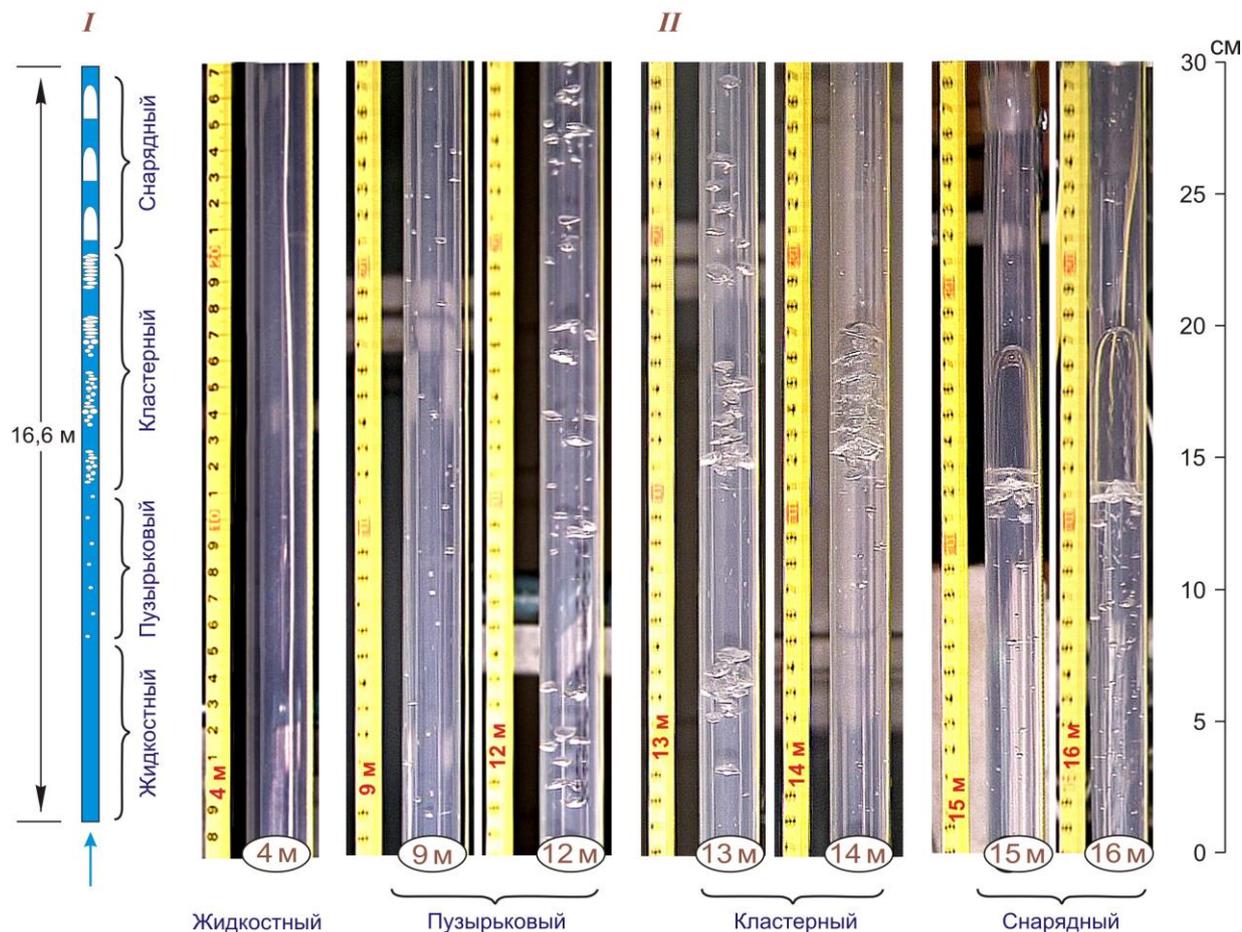
**4.2.1.** Анализ разнообразия режимов течения одной и той же модельной жидкости показал, что четыре режима – жидкостный, пузырьковый, блокированных кластеров и снарядный являются продуктом эволюции газонасыщенного потока и имеют свои конкретные морфологические особенности (**рис. 4-02**).

**4.2.2.** В ходе экспериментов выявлен и описан новый, ранее неизвестный режим течения двухфазных смесей в вертикальной колонне – блокированных кластеров (см. **рис. 4-02**, 13 и 14 м), характеризующийся закономерным чередованием плотных скоплений газовых пузырьков (кластеров), разделенных между собой жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы. Механизм образования кластеров обусловлен взаимодействием крупных газовых пузырьков со стенками канала, в результате чего возникают эффекты самозапираания и торможения. Эти процессы приводят к тому, что создается относительно медленно движущаяся динамическая газовая пробка – блокированный кластер.

**4.2.3.** Проведено сопоставление акустической записи снарядного режима на верхнем срезе экспериментальной колонны КАМБИ с сейсмической записью взрывной активности вершинного кратера Ключевского вулкана в 2007 г. На **рис. 2-04 б, в** видно, что экспериментальный и природный сигналы имеют общие черты. В обоих случаях они отражают дискретные, разноамплитудные, квазипериодические процессы. Это позволяет полагать, что газогидродинамические процессы, смоделированные в экспериментах на КАМБИ и происходящие в реальных магмоподводящих системах, имеют общую природу.

**4.2.4.** Проведенные исследования позволили предложить новую модель эволюционного газогидродинамического движения магматического расплава в подводящем канале базальтового вулкана. Многообразие взрывных явлений в кратере вулкана обусловлено реализацией на поверхности различных режимов течения двухфазного магматического потока в подводящем канале. В зависимости от проявления того или иного типа режима в жерле вулкана может наблюдаться равномерное или дискретное поступление магматического материала: в первом случае – излияние лавы и непрерывная пепловая эмиссия, во втором – пепловые, бомбовые или пеплово-бомбовые взрывы.

**4.2.5.** Анализ причин проявления основных форм взрывов базальтовых магм в жерле вулкана позволил объяснить их с позиции газогидродинамических режимов: 1) слабые пепловые взрывы с небольшим количеством бомб – начальная фаза режима блокированных кластеров, 2) сильные пеплово-бомбовые взрывы – зрелый режим блокированных кластеров, 3) бомбовые – снарядный режим, начальная фаза, 4) бомбовые, переходящие в пепловые, – зрелые газовые снаряды, сопровождаемые шлейфом мелких пузырьков.



**Рис. 4-02.** Фрагменты газогидродинамических режимов, возникающих в процессе подъема газонасыщенной жидкости в прозрачной вертикальной колонне ( $\text{Ø}_{\text{внутр.}} = 18 \text{ мм}$ ,  $h = 16,6 \text{ м}$ ), по [Озеров, 2007].

*I* – схематическое положение газогидродинамических режимов по колонне, снизу вверх;

*II* – видеокadres режимов течения газонасыщенной модельной жидкости в вертикальной колонне. Для каждого видеокadres в эллипсах указана высота (м) от нижнего края экспериментальной колонны.

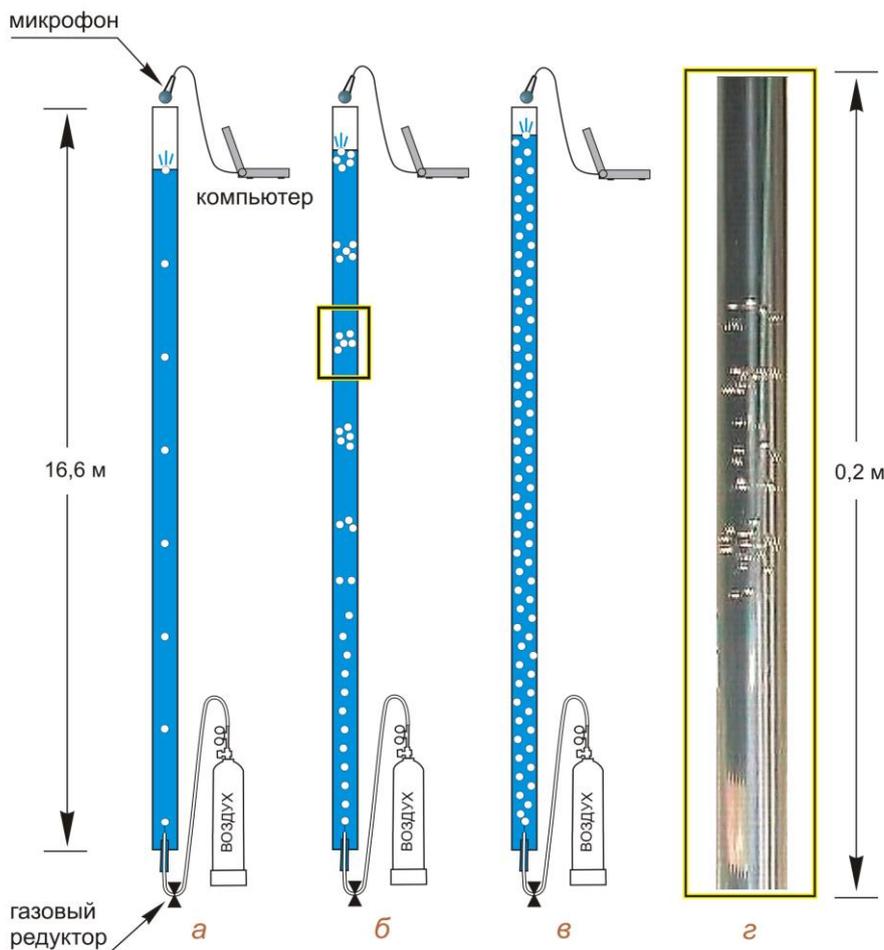
**4.2.6.** Изучение характера взрывов на базальтовых вулканах, с учетом полученных экспериментальных данных, позволило по новому определить механизм подготовки взрывов базальтовых магм как процесс газогидродинамического преобразования магматического расплава, поднимающегося по вертикальному питающему каналу вулкана.

### 4.3. Механизм периодического фонтанирования

Параметры экспериментального моделирования:

барботажная колонна,  $\text{Ø}_{\text{внутр.}} = 18 \text{ мм}$ ,  $h_{\text{колонны}} = 15,7 \text{ м}$ ,  $\text{Ø}_{\text{пузырьков}} \sim 2,5 \text{ мм}$ .

**4.3.1.** Анализ разнообразия режимов течения двухфазных потоков в вертикальной барботажной колонне показал, что три газогидродинамических режима, последовательно возникающих в экспериментальной колонне при увеличении расхода газа – пузырьковый (низкодебитный), открытых пузырьковых кластеров (среднедебитный) и пузырьковый (высокодебитный), являются продуктами эволюции самого двухфазного потока (рис. 4-03). Они имеют четкие морфологические особенности, которые определяются, главным образом, расходом газа, поступающего в систему. При определенных расходах газа вертикальный канал работает как сепаратор-дозатор газовой фазы.



**Рис. 4-03.** Схематическое изображение газогидродинамических режимов при увеличении расхода газа, по [Озеров, 2011].

а – пузырьковый равномерный (низкодебитный) режим;

б – пузырьковый равномерный в нижней части колонны, переходящий в кластерный – периодический в средней части колонны (среднедебитный). Прямоугольником ограничен участок колонны с пузырьковым кластером, рис. г;

в – пузырьковый равномерный (высокодебитный);

г – фотография открытого пузырькового кластера, состоящего из 40 пузырьков.

**4.3.2.** В результате экспериментальных исследований установлена новая группа газовых пузырьков – упругие пузырьки. Упругие пузырьки обладают высокой подвижностью, имеют горизонтально приплюснутую форму (эллипсоид). Для них характерно упругое соударение, при этом они не сливаются. В отличие от первых – мягкие пузырьки характеризуются средней подвижностью, имеют приплюснутую или вертикально вытянутую форму, стремятся к сближению и объединению. Установлена ведущая роль упругих пузырьков в образовании открытых пузырьковых кластеров.

**4.3.3.** При проведении экспериментов выявлен и описан новый, ранее неизвестный режим течения двухфазных смесей в вертикальной колонне – режим открытых кластеров. Он характеризуется закономерным чередованием скоплений газовых пузырьков – кластеров, разделенных между собой жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы. Механизм образования открытых кластеров в вертикальном канале хорошо объясняется свойствами одноразмерных упругих пузырьков: догонять друг друга, создавать горизонтальные структуры максимального торможения, улавливать поднимающиеся снизу пузырьки и не давать им возможности покинуть границы кластера. Именно режим открытых кластеров является причиной периодического фонтанирования раскаленных бомб при извержениях базальтовых вулканов.

**4.3.4.** Проведено сравнение результатов изучения вулканического дрожания при извержении Ключевского вулкана 1993 г. (см. **рис. 2-05 а**) с данными акустических исследований на КАМБИ (по измерению звуковых волн, производимых лопающимися газовыми пузырьками на поверхности модельной жидкости) (см. **рис.**

**2-05 б).** Сопоставление природного и экспериментального графиков демонстрирует большое их сходство в последовательной реализации трех режимов в паре природный процесс–эксперимент, соответственно: 1 – равномерный низкоинтенсивный–равномерный низкодебитный, 2 – периодический в обоих процессах, 3 – равномерный высокоинтенсивный–равномерный высокодебитный. При этом установлены две области смены режимов – как при извержении вулкана, так и в экспериментальных исследованиях: ОИР-1 «входа» в периодический режим и ОИР-2 «выхода» из него.

Полученные данные подтвердили правомерность использования результатов экспериментальных исследований на КАМБИ для объяснения механизма процессов, происходящих в подводном канале Ключевского вулкана. Результаты экспериментального моделирования позволяют полагать, что аналогичный процесс реализуется при извержениях вулкана, когда из жидкой магмы в кратере за счет лопающихся газовых пузырьков происходит фонтанирование лавы, и вылетают пластичные базальтовые бомбы.

**4.3.5.** Предложена новая модель эволюционного газогидродинамического движения магматического расплава в подводном канале базальтового вулкана. Проявления различных режимов течения двухфазного магматического расплава при выходе на поверхность ответственны за многообразие взрывных явлений в кратере вулкана. В зависимости от типа режима на базальтовых вулканах могут проявляться различные типы взрывной деятельности: равномерная пепловая эмиссия с небольшим количеством вулканических бомб или без них, энергичное периодическое фонтанирование раскаленных бомб и интенсивная продолжительная монотонная «работа» раскаленных фонтанов.

#### **4.4. Обсуждение результатов**

**4.4.1.** Ранее в гидродинамике вертикальных труб было известно 5 режимов течения двухфазных смесей: пузырьковый, снарядный, смешанный, кольцевой и капельный (**рис. 3-03**). Эксперименты на КАМБИ позволили установить еще 4 новых газогидродинамических режима (**рис. 3-03**) – равномерный пенный (**рис. 4-01 а**), пенных кластеров (**рис. 4-01 б, в**), заблокированных кластеров (**рис. 4-02** (13 и 14 м)) и открытых кластеров (**рис. 4-03 б**). Описания этих режимов отсутствуют как в работах [*Козлов, 1954б; Уоллис, 1972; Taitel, Barnea, Dukler, 1980; Кутателадзе, Накоряков, 1984; Брилл, Мукерджи, 2006; Путеводитель Прандтля по Газоэроэродинамике, 2007*], так и в публикациях по моделированию работы нефтяных скважин на крупногабаритных установках [*Абишев, Булгаков, Сахаров, 1981; Сахаров, Мохов, 2004*]. Представленные режимы являются новыми, впервые установленными свойствами вертикальных газожидкостных систем.

**4.4.2.** Открытые газогидродинамические режимы являются ключевыми для вулканологического моделирования, уточняют и дополняют картину эволюции газожидкостных потоков в вертикальных колоннах. Составлена новая схема газогидродинамических процессов в вертикальных колоннах (**рис. 3-03**), включающая 11 режимов. Представленная схема значительно расширяет возможности моделирования вулканических процессов, показывает, что периодические и монотонные режимы являются закономерными проявлениями движения газожидкостных потоков в вертикальных колоннах, объясняет механизмы конкретных типов извержений.

**4.4.3.** Установлена природа трех периодических типов извержений (см. глава 2).

Пульсирующее фонтанирование ( $T_{\text{пульс-фонт}} = 0,66\text{--}5$  с). Представляет собой процесс реализации на поверхности режима пенных кластеров (**рис. 3-03 и 4-01 б, в**). Проявление мощных периодических импульсов выбросов вулканических бомб на фоне более слабого фонтанирования является результатом последовательного выхода пенных кластеров на поверхность.

Стромболианские взрывы ( $T_{\text{стромб}} = 20$  с–20 мин). Результат реализации на поверхности режима блокированных кластеров или снарядного режима (**рис. 3-03 и 4-02** (13, 14, 15 и 16 м)). Периодичность проявления взрывов обусловлена последовательным выходом на поверхность блокированных кластеров или снарядов. Механизм образования блокированных кластеров обусловлен самоторможением крупного пузырька при взаимодействии со стенками протяженного канала и блокированием движения ниже идущих пузырьков. Газовые снаряды – результат коалесценции плотно прижатых друг к другу пузырьков блокированного кластера.

Периодическое фонтанирование ( $T_{\text{период-фонт}} = 1,5\text{--}8$  час). Результат реализации на поверхности режима открытых пузырьковых кластеров (**рис. 3-03 и 4-03 б, з**). Эпизоды фонтанирования бомб определяются периодическим выходом на поверхность открытых кластеров. Механизм образования открытых кластеров в вертикальном канале обусловлен свойствами одноразмерных пузырьков догонять друг друга и объединяться в группы, выйти за пределы которых в дальнейшем они не могут.

**4.4.4.** Монотонные, равномерные типы извержений формируются однородными газогидродинамическими режимами в подводящем канале вулкана:

- постоянное излияние лавы – жидкостный режим (**рис. 3-03 и 4-02** (4 м));
- монотонная пепловая эмиссия – пузырьковый режим (**рис. 3-03 и 4-02** (9 и 12 м));
- равномерная бомбово-пепловая деятельность – смешанный режим (**рис. 3-03**);
- постоянное фонтанирование бомб – пенный режим (**рис. 3-03, 4-01 а, 4-03 в**);
- интенсивная раскаленная газовая струя ( $T \geq 900$  °С) – газовый режим (**рис. 3-03**).

**4.4.5.** Описаний двухфазных потоков в вертикальных колоннах как целостных структур и преобразований, происходящих в них при подъеме, в гидродинамике нет. В результате экспериментов установлено 3 принципиально различных типа газогидродинамических потоков: пенный, снарядный и одноразмерных пузырьков. Показано, что и периодические, и монотонные режимы являются характерным свойством каждого из трех двухфазных потоков. Эти данные позволяют утверждать, что для получения периодических режимов в динамике извержений нет необходимости привлекать гипотетический магматический очаг [*Vergnolle, Jaupart, 1986, 1990*], свод которого способен влиять на характер движения газожидкостного магматического потока.

**4.4.6.** Рассмотрен вопрос о возможности формирования разных режимов извержения одним магматическим расплавом. Показана важность геометрических размеров (диаметров) подводящих каналов. Проведено сопоставление экспериментов с одной и той же газонасыщенной модельной жидкостью ( $P_{\text{насыщения}} = 1,6$  атм.) в трубах одной высоты ( $h = 16,6$  мм), но разного внутреннего диаметра ( $\varnothing_{\text{min}} = 18$  мм и  $\varnothing_{\text{max}} = 50$  мм) (см. **разделы 4.1. и 4.2.**). Установлено, что при большом диаметре колонн выделяется большое количество пузырьков, но они вырастают до малых размеров, а при маленьком диаметре колонн выделяется

меньше пузырьков, но они дорастают до больших размеров. При сопоставлении режимов течения видно, что при большом диаметре формируются режимы пенный и пенных кластеров, а при маленьком – блокированных кластеров и снарядный.

Приведенные данные впервые показывают, что при разных диаметрах колонн из одной и той же модельной жидкости выделяется разное количество пузырьков и формируются разные газогидродинамические режимы. Таким образом, геометрические размеры, в нашем случае, диаметр подводящих каналов, при прочих равных условиях, имеют принципиальное значение при формировании конкретного режима извержения.

**4.4.7.** В заключении, в тезисном виде, представим то новое, что удалось получить во время 12-летних газогидродинамических исследований на КАМБИ, то, что явилось экспериментальной основой моделирования вулканических процессов:

- установлено 4 новых режима течения двухфазных смесей в вертикальных колоннах – пенный, пенных кластеров, блокированных кластеров, открытых кластеров;

- выделено 3 типа газогидродинамических потоков – пенный, снарядный и одноразмерных пузырьков;

- показано, что возникновение дискретных режимов в вертикальных колоннах, это закономерный результат развития газожидкостных потоков;

- установлено, что диаметр колонны, при прочих равных условиях, имеет определяющую роль при формировании конкретного газогидродинамического режима;

- выделен новый тип газовых пузырьков – упругие пузырьки, описано их групповое движение;

- установлены механизмы формирования впервые выделенных газогидродинамических структур – блокированных кластеров и открытых кластеров;

- составлена новая схема режимов течения двухфазных смесей в вертикальных колоннах;

- показана возможность моделирования реальных процессов в подводящих системах «жидких» базальтовых вулканов при помощи вертикальных газогидродинамических экспериментальных колонн.

Защищаемое положение Главы 4 – см. Введение, стр. 6.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотрены главные эруптивные составляющие единого вулканического процесса: формирование высокомагнезиальных–высокоглиноземистых базальт-андезибазальтовых расплавов, механика их движения и динамика извержения. Цель исследований – определение генезиса изучаемых явлений, создание схем и механизмов природных процессов. Разработана эруптивная модель Ключевского вулкана. Такая модель для вулканов базальт-андезибазальтового типа предложена впервые. Представим три главные составляющие модели.

1. Все разнообразие расплавов вулкана ( $MgO$  12,3–4,1 мас.%) образовалось из исходной высокомагнезиальной базальтовой магмы в 35-километровом генеральном магмоводе вулкана. Эволюционные преобразования магм обеспечиваются двумя процессами – автосмещением и кристаллизационным фракционированием. Процесс автосмещения реализуется во время подъема магмы при вершинных извержениях. Гипсометрически более низкие, горячие

магнезиальные порции расплава, содержащие богатые MgO OI и Crx, попадают в расположенные выше, более холодные глиноземистые порции расплава. Многократное повторение циклов автосмещения увеличивает содержание MgO в вышерасположенных расплавах и привносит в глиноземистые порции высоко-Fo OI и высоко-Mg# Crx, нехарактерные для этих составов магм. Процесс декомпрессионного фракционирования OI и Crx происходит между вершинными извержениями, когда скорость подъема расплава в генеральном магмоводе снижается до нуля. На первый план выходит процесс фракционной отсадки OI и Crx, в результате в верхней части магмовода формируются высокоглиноземистые базальтоиды, вниз по магмоводу они постепенно сменяются глиноземистыми, магнезиальными и высокомагнезиальными составами.

Для получения непрерывной серии пород необходимо, чтобы магматические расплавы достигали поверхности двумя принципиально различными способами. Через вершинный кратер, венчающий генеральный магмовод, поступают высокоглиноземистые андезибазальты (4–5 мас.% MgO). Через боковые прорывы по одноразовым трещинам/каналам, отделяющимся от генерального магмовода, поступают высокомагнезиальные–высокоглиноземистые базальтоиды (5–12 мас.% MgO). Во втором случае, прокладывая новый путь сквозь вышележащую толщу пород, расплав попадает в условия более низких температур. Увеличивается его вязкость, теряется способность эволюционировать, поэтому разнообразие пород определяется глубиной отделения расплава от генерального магмовода.

2. В верхней части питающей системы из расплава в свободную фазу выделяется газ. Газовые пузырьки, достигая размера десятки – сотни микрон, начинают двигаться быстрее вмещающей их магмы. По мере подъема размер пузырьков увеличивается, их количество возрастает. Кардинальным образом меняется структура расплава: магматическая колонна превращается в газожидкостный поток, движущийся вверх по вертикальному каналу. В зависимости от расхода, свойств магмы и размера питающего канала в газожидкостном потоке возникают разные режимы течения. Впервые нами экспериментально установлены четыре режима течения – пенный, пенных кластеров, блокированных кластеров и открытых кластеров. Это позволило разработать новую схему режимов течения двухфазных потоков, состоящую из 11 типов – от жидкостного до газового, которая объясняет многообразие типов базальтовых извержений.

3. Достигнув поверхности, газожидкостный поток в зависимости от режима течения может генерировать разные типы извержений. Пульсирующее фонтанирование обусловлено возникновением в магматическом потоке пенных кластеров; стромболианские взрывы определяются выходом на поверхность блокированных кластеров или образующихся из них газовых снарядов; периодическое фонтанирование связано с реализацией в кратере режима открытых пузырьков кластеров. Монотонные извержения формируются равномерными газогидродинамическими режимами – жидкостным, пузырьковым, смешанным, пенным или газовым. Характер каждого типа извержения коррелирует с конкретным газогидродинамическим режимом в подводящем канале. Систематизация механизмов разных типов извержений позволяет объяснить природу и разнообразие базальтового вулканизма.

Автор полагает, что полученные данные, установленные явления и построенные модели станут основой для дальнейшего изучения базальтового–андезиобазальтового островодужного вулканизма.

### **Основные публикации по теме диссертации.**

Основные результаты диссертации отражены в 118 работах, из них 30 статей в журналах, рекомендованных ВАК, и 4-е крупных раздела в коллективных монографиях.

#### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:**

1. *Альмеев Р.Р., Арискин А.А., Озеров А.А., Кононкова Н.Н.* Проблемы стехиометрии и термобарометрии магматических амфиболов (на примере роговых обманок из андезитов вулкана Безымянный, Восточная Камчатка) // *Геохимия*. 2002. № 8. С. 803–819.
2. *Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсен Р.Л.* Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // *Петрология*. Т. 3. № 5. 1995. С. 42–67.
3. *Гирина О.А., Нуждина И.Н., Озеров А.Ю., Зеленский М.Е., Демянчук Ю.В.* Извержение вулкана Безымянный 7 августа 2001 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2005. № 3. С. 3–8.
4. *Иванов Б.В., Гавриленко Г.М., Двигало В.Н., Овсянников А.А., Озеров А.Ю., Разина А.И., Токарев П.И., Хренов А.П., Чирков А.М.* Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 1983 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1984. № 6. С. 114–122.
5. *Конов А.С., Озеров А.Ю.* Закономерности в динамике извержений Ключевского вулкана и сопровождающем их вулканическом дрожании // *Вулканология и сейсмология*. 1988. № 33. С. 21–38.
6. *Кирсанов И.Т., Озеров А.Ю.* Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелого в 1980–1981 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1983. № 1. С. 25–42.
7. *Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А., Озеров А.Ю., Магуськин М.А., Двигало В.Н., Андреев В.И., Иванов В.В., Карташева Л.А., Марков И.А.* Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреатоматическое извержение в кальдере Академии Наук // *Вулканология и сейсмология*. 1997. № 5. С. 38–70.
8. *Озеров А.Ю.* Динамика извержения Карымского вулкана (Камчатка) в 1996 г. и состав его продуктов // *Вестник ДВО РАН*. 1997. № 3. С. 86–93.
9. *Озеров А.Ю.* Механизм базальтовых взрывов (экспериментальное моделирование) // *Вулканология и сейсмология*. 2010. № 5. С. 1–17.
10. *Озеров А.Ю.* Новое извержение Ключевского вулкана // *Природа*. 1995. № 3. С. 17–21.
11. *Озеров А.Ю., Арискин А.А., Бармина Г.С.* К проблеме генетических взаимоотношений высокоглиноземистых и высокомагнезиальных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // *Доклады Академии Наук*. Т. 350. № 1. 1996. С. 104–107.
12. *Озеров А.Ю., Арискин А.А., Кайл Ф., Богоявленская Г.Е., Карпенко С.Ф.* Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // *Петрология*. 1997. Т. 5. № 6. С. 614–635.
13. *Озеров А.Ю., Демянчук Ю.В.* Пароксизмальное извержение вулкана молодой Шивелуч 10 мая 2004 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2004. № 5. С. 75–80.
14. *Озеров А.Ю., Демянчук Ю.В., Сторчеус А.В., Карпов Г.А.* Извержение вулкана Безымянный 6–8 октября 1995 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1996. № 3. С. 107–110.
15. *Озеров А.Ю., Гордеев Е.И.* Извержение вулкана Эйяфьятлакутль (Исландия) в 2010 году // *Земля и Вселенная*. 2011. № 1. С. 21–30.
16. *Озеров А.Ю., Карпов Г.А.* Извержение Ключевского вулкана 8 сентября – 2 октября 1994 г. // *Вестник ДВО РАН*. 1995. № 2. С. 114–119.
17. *Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дроздин В.А., Двигало В.Н., Демянчук Ю.В., Иванов В.В., Белоусов А.Б., Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Ящук В.В., Округина А.М.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября – 2 октября 1994 г. (Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*. 1996. № 5. С. 3–16.
18. *Озеров А.Ю., Селифонова Л.Л.* Активность вулканов мира в 1985 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1989. № 3. С. 102–107.

19. *Сторчеус А.В., Фирстов П.П., Озеров А.Ю.* Возможный механизм генерации акустических и сейсмических волн при пульсирующем истечении газо-пепловой смеси на вулкане Карымский // *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 6. С. 3–16.
20. *Толстых М.Л., Наумов В.Б., Гавриленко М.Г., Озеров А.Ю., Кононкова Н.Н.* Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов вулканического центра Горелый (Южная Камчатка) по данным изучения включений в минералах // *Геохимия*. 2012. № 6. С. 576–606.
21. *Толстых М.Л., Наумов В.Б., Озеров А.Ю., Кононкова Н.Н.* Состав магм извержения 1996 г. Карымского вулканического центра (Камчатка) по данным изучения расплавных включений // *Геохимия*. 2001. № 5. С. 498–509.
22. *Хренов А.П., Озеров А.Ю., Литасов Н.Е., Слезин Ю.Б., Муравьев Я.Д., Жаринов Н.А.* Побочное извержение Ключевского вулкана (прорыв Предсказанный, 1983 г.) // *Вулканология и сейсмология*. 1985. № 1. С. 3–20.
23. *Хренов А.П., Ананьев В.В., Балусев Э.Ю., Литасов Н.Е., Озеров А.Ю.* Петрология продуктов извержений Ключевского вулкана (прорыв Предсказанный, 1983 г.) // *Вулканология и сейсмология*. 1985. № 1. С. 47–70.
24. *Almeev R., Kimura J., Ariskin A., Ozerov A.* Decoding crystal fractionation in calc-alkaline magmas from the Bezymianny Volcano (Kamchatka, Russia) using mineral and bulk rock compositions // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 263. P. 141–171.
25. *Levin, V.L., Park, J.J., Brandon M.T., Lees, J.M., Peyton, V., Gordeev, E.I., Ozerov, A.Yu.* Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver functions // *Tectonophysics*. 2002. V. 358. P. 233–265.
26. *Ozerov A.Yu.* Experimental Modeling of the Explosion Mechanism of Basaltic Magmas // *Petrology*. 2009. V. 17. № 7. P. 653–668.
27. *Ozerov A.Y.* The evolution of high-alumina basalts of the Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia, based on microprobe analyses of mineral inclusions // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2000. № 95. P. 65–79.
28. *Ozerov A., Ispolatov I., Lees J.* Modeling Strombolian eruption of Karymsky volcano, Kamchatka, Russia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2003. V. 122. P. 265–280.
29. *Peyton V., Levin V., Park J., Brandon M., Lees J., Gordeev E., Ozerov A.* Mantle Flow at a Slab Edge: Seismic Anisotropy in the Kamchatka Region // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. № 2. P. 379–382.
30. *Viccaro M., Giuffrida M., Nicotra E., Ozerov A.Y.* Magma storage, ascent and recharge history prior to the 1991 eruption at Avachinsky Volcano, Kamchatka, Russia: Inferences on the plumbing system geometry // *Lithos*. 2012. V. 140. P. 11–24.

#### **В коллективных монографиях:**

31. *Озеров А.Ю.* Механизм периодического фонтанирования базальтовых вулканов (по экспериментальным исследованиям и природным наблюдениям) // *Экстремальные природные явления и катастрофы*. Том. 2. М.: 2011. С. 351–374.
32. *Ozerov A.Yu., Firstov P.P., Gavrillov V.A.* Periodicities in the Dynamics of Eruptions of Klyuchevskoi Volcano, Kamchatka // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*. AGU Geophysical Monograph Series. V. 172. 2007. P. 283–291.
33. *Lees J.M., VanDecar J., Gordeev E., Ozerov A., Brandon M., Park J., Levin V.* Three Dimensional Images of the Kamchatka-Pacific Plate Cusp // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*. AGU Geophysical Monograph Series. V. 172. 2007. P. 65–75.
34. *Lees J.M., Symons N., Chubarova O., Gorelchik V., Ozerov A.* Tomographic Images of Klyuchevskoi Volcano P-wave Velocity // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*. AGU Geophysical Monograph Series. V. 172. 2007. P. 293–302.

#### **Кандидатская диссертация:**

*Озеров А.Ю.* Динамика извержений и петрохимические особенности глиноземистых базальтов Ключевского вулкана. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Москва. 1993. 228 с. Институт литосферы РАН, председатель Ученого совета чл.-корр. РАН Н.А. Богданов, внутренний оппонент докт. геол.-мин. наук Н.И. Филатова. Официальные оппоненты: канд. физ.-мат. наук А.И. Фарберов и профессор, докт. геол.-мин. наук Т.И. Фролова.

Подписано в печать 26.02.2016 г.  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Формат А4/2. Усл. печ. л.2.  
Заказ № 367. Тираж 100 экз.  
Типография «КОПИЦЕНТР»  
119234, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д.20  
Тел. 8 (495) 213-88-17  
[www.autoreferat1.ru](http://www.autoreferat1.ru)