

На правах рукописи



ГОРБАЧ Наталия Владимировна

**ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ МАГМ ВУЛКАНИЧЕСКОГО
МАССИВА ШИВЕЛУЧ (КАМЧАТКА) ПО ГЕОЛОГИЧЕСКИМ И
ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

Специальность

25.00.04 - петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Владивосток, 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических наук, доцент
Портнягин Максим Владимирович,
(ГЕОХИ РАН, г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
Тарарин Игорь Александрович
(ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток)
доктор геолого-минералогических наук
Колосков Александр Валерианович
(ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск- Камчатский)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва)

Защита состоится 22 ноября 2013 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.006.01 при Федеральном бюджетном учреждении науки Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН по адресу:
690022, г. Владивосток, пр-т 100 лет Владивостоку, 159.
Тел.: +7(423)231-87-50, Факс: +7(423)231-78-47,
E-mail: sbi@yandex.ru, office@fegi.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ДВО РАН (адрес тот же).

Автореферат разослан « » октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 005.006.01
кандидат геолого-минералогических наук



Б.И. Семеняк

ВВЕДЕНИЕ

Вулканический массив Шивелуч на Камчатке привлекает огромное внимание исследователей в силу ряда исключительных особенностей. Шивелуч расположен в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (Рис.1). Характерным типом пород вулканического массива являются магнезиальные андезиты, нетипичные для других активных вулканов Камчатки (Volynets, 1994). Масштабы и частота извержений делают вулкан наиболее активным эксплозивным центром Камчатки в голоцене (Ponomareva et al., 2007). После Ключевского вулкана Шивелуч является вторым по продуктивности (36 млн.т/год), а по количеству изверженных андезитов не имеет аналогов среди четвертичных вулканов в пределах Курило-Камчатской островной дуги (Мелекесцев и др., 1991).

Целью работы являлась реконструкция эволюции магм вулканического массива Шивелуч на основе детальной петролого-геохимической характеристики пород, соответствующих различным временным этапам его формирования. В работе решались следующие задачи:

- 1) Уточнение геологического строения вулканического массива Шивелуч, картирование и геохимическое опробование пород различных этапов его формирования;
- 2) Петрографическая типизация пород, а также определение их относительных возрастных и объемных соотношений;
- 3) Детальная минералогическая и геохимическая характеристика выделенных типов пород;
- 4) Оценка физико-химических условий образования и эволюции магм на различных этапах формирования вулканического массива;
- 5) Анализ существующих моделей образования и эволюции магм вулканического массива Шивелуч. Разработка новой взаимосогласованной модели, учитывающей петролого-геохимические особенности пород и геофизические данные.

Актуальность исследований. Проблема происхождения магнезиальных андезитов - одна из центральных в петрологии и геохимии. Интерес к магнезиальным андезитам обусловлен близостью состава таких пород к среднему составу континентальной коры (напр., Kelemen et al., 1995, 2003) и выяснение условий их происхождения является важным для понимания образования и эволюции континентальной коры. Реконструкция условий эволюции магм в питающей магматической системе вулканического массива Шивелуч имеет также особую актуальность в связи с высокой эксплозивностью его извержений и связанной с ними опасностью.

Научная новизна. На основе новых фактических данных построена схема геологического строения вулканического массива Шивелуч, отражающая особенности состава изверженных пород; реконструированы эруптивные центры позднеплейстоценового лавового комплекса; определены относительные объемные и временные соотношения различных типов пород. Впервые дана детальная петрологическая и изотопно-геохимическая характеристика пород, отвечающих различным этапам формирования вулканического массива Шивелуч: от ранних этапов активности и до продуктов текущих извержений. Предложена взаимосогласованная петрологическая модель строения и эволюции питающей

системы вулканического массива, которая не противоречит имеющимся на сегодняшний день геофизическим данным.

Фактическая основа работы. Работа основана на изучении коллекции более 300 образцов вулканических пород, собранных автором в ходе полевых работ 2004-2011 гг. Коллекция сформирована с учетом стратиграфической позиции образцов и охватывает все этапы формирования вулканического массива. Образцы начального периода формирования современного экструзивного купола (экструзивные лавы, изверженные в 1980-1981 гг.) были переданы автору Ю.М. Дубиком. Ряд образцов экструзивных лав и пирокластики, характеризующих извержения 1993-1995 и 2001 гг. были любезно предоставлены С.А. Хубуная.

При выполнении работы использовались методы геологического картирования, дешифрирования аэрофотоснимков, полевое описание пород и их предварительная макроскопическая типизация. Петрографическими методами было исследовано около 400 прозрачно-полированных шлифов и мономинеральные фракции оливина, пироксена, амфибола и плагиоклаза из представительных образцов. Для геохимической и минералогической характеристики пород вулкана были использованы методы рентгенофлуоресцентного анализа (главные и редкие элементы в породах – 106 анализов; электронно-зондового анализа (петрогенные элементы и ряд микроэлементов в породообразующих минералах и интерстициальных стеклах – около 3500 анализов), масс-спектрометрия с индукционно-связанной плазмой (ICP-MS; редкие и редкоземельные элементы в породах – 30 анализов), масс-спектрометрия с термической ионизацией (TIMS; изотопный состав стронция и неодима - 20 анализов). Все анализы за исключением части электронно-зондовых исследований, выполненных в ИВиС ДВО РАН, были проведены в Центре исследований океана им. Гельмгольца (Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, GEOMAR) и в Институте наук о Земле при Университете им. Кристиана-Альбрехта (г. Киль, ФРГ) с соблюдением международных стандартов как в пробоподготовке, так и при выполнении анализов.

Личный вклад автора. Организация и проведение полевых работ на вулкане, картирование и геохимическое опробование, петрографическое изучение и типизация пород. Подготовка каменного материала для различных анализов, отбор мономинеральных фракций, изготовление прозрачно-полированных препаратов и их анализ на электронном зонде. Анализ и систематизация полученных результатов и сравнение с литературными данными.

Практическое значение. Новые геологические, геохимические и минералогические данные, полученные в ходе выполнения работы, могут быть использованы в дальнейших исследованиях вулканического массива Шивелуч, в том числе и для оценки опасности его будущих извержений, а также при построении моделей генерации магм в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

Структура и объем. Диссертация состоит из 5 глав, введения, заключения и дополнительных материалов, включающих каталог изученных образцов (Приложение 1), таблиц химических анализов пород (Приложение 2) и минералов (Приложение 3). Основной материал изложен на 172 страницах, содержит 12 таблиц, 59 рисунков. Список литературы включает 192 наименования.

Апробация работы. По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 4 статьи в рецензируемых изданиях, входящих в список ВАК. Результаты исследований

докладывались на российских и международных совещаниях и конференциях: Ежегодные конференции, посвященные дню вулканолога (Петропавловск-Камчатский, 2006; 2007; 2011), Симпозиумы по вулканологии и палеовулканологии (Улан-Удэ 2006; Петропавловск-Камчатский, 2009), Международном симпозиуме, посвященном проблемам эксплозивного вулканизма, Петропавловск-Камчатский, 2006; Новые идеи в науках о Земле, Москва, 2007; Конференции «Merapi and Merapi Type Volcanoes in the World with Their Phenomena» (г. Джогджакарта, Индонезия, 2006); Рабочем совещании в рамках проекта «Partnership for Volcanological Research and Education», (Ванкувер, США, 2007); Biannual workshops on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction processes: mitigating risk through international volcano, earthquake, and, tsunami science (JKASP) Япония, 2006; США, 2009; Петропавловск-Камчатский, 2011; Рабочих совещаниях по проекту KALMAR - Kurile-Kamchatka and the Aleutian Marginal Sea-Island Arc Systems (Петропавловск-Камчатский, 2009; Trier, Germany, 2011).

Благодарности. Автор выражает огромную благодарность научному руководителю М.В. Портнягину за руководство работой и создание условий для ее выполнения, В.В. Пономаревой и И.В. Мелекесцеву (ИВиС ДВО РАН), М.М. Певзнер (ГИН РАН), А.Д. Бабанскому (ИГЕМ РАН), Г.П. Авдейко, А.В. Колоскову, Е.Г. Сидорову, С.А. Хубуная и А.Ю. Озерову (ИВиС ДВО РАН) за обсуждение результатов работы и ценные замечания, С.В. Высоцкому, А.А. Чащину, В.Ф. Полину и С.О. Максимову (ДВГИ ДВО РАН) за доброжелательную критику, Т.М. Философовой (ИВиС ДВО РАН) за помощь в микрозондовом анализе на начальных этапах исследования, Д. Рау и М. Тёнер (GEOMAR, Киль, ФРГ) за помощь в проведении анализов пород и минералов, Ф. Хауфф (GEOMAR, Киль, ФРГ) за проведение изотопных анализов и Д. Гарбе-Шенбергу за проведение микроэлементного анализа (Университет г. Киль, ФРГ). Особая благодарность Г.Е. Богоявленской за мотивацию к изучению андезитовых вулканов и С.А. Хубуная за первый совместный маршрут к активному кратеру вулкана Шивелуч. Большое спасибо моим друзьям и коллегам Р.Н. Сагитовой, И.И. Тембрелу, С.Б. Самойленко и Т.М. Маневич за неоценимую помощь в осуществлении полевых работ.

Работа выполнена в Лаборатории активного вулканизма и динамики извержений ИВиС ДВО РАН, возглавляемой академиком Е.И. Гордеевым. Автор искренне признательна всему коллективу за поддержку.

Полевые исследования выполнены при поддержке грантов ДВО РАН 06-III-B-08-369, 07-III-D-08-094, 07-III-B-08-095, 09-III-A-08-422, РФФИ-ДВО РАН 11-05-98555 р_восток_a. Аналитические исследования выполнены в рамках российско-германского проекта КАЛЬМАР (подпроект «Пространственная и временная эволюция вулканизма и магматизма в области Алеутско-Камчатского сочленения») при поддержке министерств Науки и Образования РФ и ФРГ.

Работа посвящена светлой памяти Марии Егоровны Бояриновой с благодарностью за первые уроки полевой геологии.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РАБОТ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Начало истории изучения вулканического массива Шивелуч относится к середине XIX века. Большую историческую ценность представляют на сегодняшний день первые сообщения об активности вулкана (Erman, 1848; Bogdanovitsh, 1904),

цитируется по (Меняйлов, 1955). Работы Б.И. Пийпа и А.Н. Заварицкого положили начало изучению современных извержений и петрографии пород Шивелуча (Заварицкий, 1936; Пийп, 1945). Первое систематическое описание вулкана и его изверженных продуктов дано А.А. Меняйловым (1955). Позднее сведения о строении вулканического массива и составе его пород были существенно дополнены данными И.В. Мелекесцева с соавторами (Мелекесцев и др., 1991).

В 1970-ых годах были начаты систематические работы по реконструкции эруптивной деятельности вулкана в голоцене. В результате этих работ была не только восстановлена история извержений Молодого Шивелуча, но и получена тефростратиграфическая шкала, позволяющая датировать различные события в пределах полуострова (Ponovareva et al., 1998, 2007). Датированные прослой тефры крупнейших извержений Молодого Шивелуча являются возрастными маркерами, которые используются для расчленения и корреляции голоценовых вулканогенных и осадочных отложений Камчатки (Braitseva et al., 1997).

Современным извержениям вулкана посвящено большое количество публикаций (Меняйлов, 1955; Пийп, Мархинин, 1965; Токарев, 1967; Горшков, Дубик, 1969, Белоусов, Белоусова, 1995; Хубуная, 1995; Фирстов и др., 1996; Мелекесцев и др., 2003; Федотов и др., 2001, 2004; Гирина и др., 2006; Горбач, 2006; Овсянников, Маневич, 2010; Жаринов, Демянчук, 2008, 2013; Dirksen et al., 2006; Humphreys et al., 2006 и др.).

Геохимическим и петрологическим исследованиям пород вулкана посвящен ряд работ О.Н. Волынца (Волынец и др., 1997, 1998, 1999, 2000). Было установлено, что породы Шивелуча отличаются высокими магнезиальностью и относительно повышенными отношениями Sr/Y, K/Ti, La/Yb, Zr/Y, Th/Yb, Ni/Sc, Cr/Sc, а также низкими концентрациями Ca, Sc, Y, Yb (Волынец и др., 1998; 2000). Сходство этих геохимических характеристик с адакитами послужило основой для гипотезы о том, что вулкан питается расплавами субдуцирующей Тихоокеанской плиты (Yogodzinsky et al., 2001; Churikova et al., 2001).

Региональные проблемы геохимии вулканических пород Центрально-Камчатской депрессии (ЦКД) и вопросы происхождения магм этого региона рассмотрены в работах (Portnyagin et al., 2005, 2007; Portnyagin, Manea, 2008). Сделано предположение, что вариации состава вулканических пород по простиранию ЦКД могут быть обусловлены вариациями термального состояния мантийного клина, а также участием и различным вкладом пироксенитового компонента в образование магм (Portnyagin et al., 2009, 2011).

Несмотря на относительно хорошую степень изученности и повышенный интерес исследователей к вулканическому массиву Шивелуч, большая часть данных о геологии, петрологии и геохимии пород относится к голоценовому периоду деятельности. Ограниченность данных о ранних этапах формирования не позволяет в настоящее время ответить на ряд принципиальных вопросов, относящихся к проблеме образования и эволюции магм массива Шивелуч. А именно: Изменялся ли состав изверженных пород во времени? Связано ли формирование одного из крупнейших вулканических массивов на Камчатке с деятельностью единого источника магм? Как влияли процессы кристаллизационной дифференциации магм в коровых условиях на геохимическую специфику пород? Чем обусловлено резкое

преобладание пород среднего состава и ограниченное распространение пород основного состава среди продуктов эруптивной активности вулкана?

Работа была направлена на решение перечисленных проблем на основе геологического картирования и петролого-геохимического исследования пород вулканического массива от ранних этапов развития до настоящего времени.

ГЛАВА 2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОГО МАССИВА ШИВЕЛУЧ

Вулканический массив имеет сложное строение и включает два главных структурных элемента – позднеплейстоценовую постройку Старого Шивелуча и действующий в голоцене эруптивный центр Молодой Шивелуч (Мелекесцев и др., 1991). В ходе начальной фазы деятельности (НФД) Старого Шивелуча была сформирована мощная толща грубообломочных пирокластических отложений, которая формирует не менее 60 % от объема позднеплейстоценовой постройки. Следующий этап развития вулканического массива в позднем плейстоцене был связан с обильными излияниями лав. На основе новых геологических данных реконструировано четыре центра, с которыми были связаны излияния лав (рис. 1). Завершающая деятельность позднеплейстоценового этапа была сосредоточена в юго-западном секторе массива (Байдарный отрог) и характеризовалась излиянием андезибазальтовых лав из центров Байдарный и Южный. На этом же этапе произошли внедрения побочных экструзий г. Семкорок на юго-восточном подножии и экструзий Северных на северо-восточном склоне Старого Шивелуча.

В конце плейстоцена южный сектор постройки Старого Шивелуча был разрушен в результате крупномасштабного обвала (Мелекесцев и др., 1991). Согласно данным (Певзнер и др., 2012), серия обвалов в южном секторе массива могла произойти в интервале 16-11.3 тыс. л.н. В голоцене эруптивная активность локализовалась в северо-западном секторе обвального цирка и была связана с мощной эксплозивной деятельностью и ростом экструзивных куполов Молодого Шивелуча. Излияния лав были характерны преимущественно для ранних этапов его деятельности (Горбач, Портнягин, 2011). На протяжении голоцена рост экструзивных куполов сопровождался формированием пирокластических потоков, обломочных лавин и лахаров, отложения которых покрывают южное подножие вулканического массива и занимают площадь около 250 км² (Ponomareva et al., 2007). Субсинхронно деятельности Молодого Шивелуча на западных склонах постройки Старого Шивелуча была сформирована группа побочных экструзивных куполов (экструзии группы Каран).

Современный кратер, образованный в результате катастрофического извержения 12 ноября 1964 г., находится в центральной части постройки Молодого Шивелуча и вмещает растущий экструзивный купол. Рост купола начался в 1980 г. и в настоящее время он представляет собой сложную многофазную экструзию. С ростом этого экструзивного купола было связано несколько эксплозивных извержений, которые сопровождались формированием пирокластических потоков (Хубуная и др., 1995; Федотов и др., 2001, 2004; Гирина и др., 2006 и др.). Последнее из таких крупных событий произошло в октябре 2010 г. (Овсянников, Маневич, 2010).

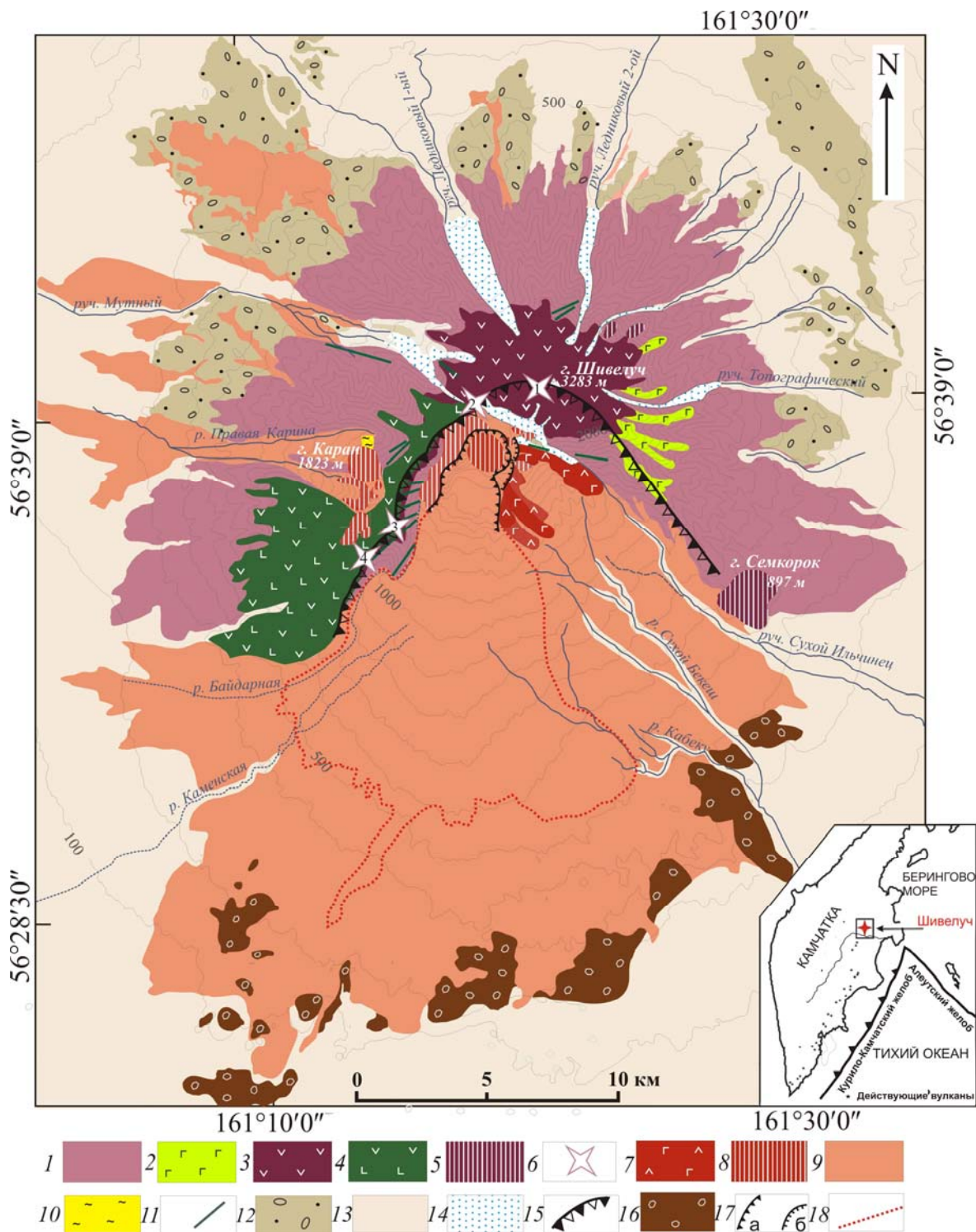


Рис. 1. Схема геологического строения вулканического массива Шивелуч. Составлена на основе полевых данных автора с использованием материалов (Лопатин и др., 1979 и Мелекесцев и др., 1991). Поля развития голоценовых пирокластических отложений выделены согласно (Ponomareva et al., 2007). На врезке показана региональная позиция вулканического массива.

Старый Шивелуч. Начальная фаза деятельности: 1 – агломератовые туфы *Hbl-Pl* и *Hbl-Px* андезитов, 2 – лавы *Ol-Cpx-Pl* андезибазальтов; **Лавовый комплекс:** 3 – лавы *Hbl-Pl* и *Hbl-Px-Pl* андезитов, реже *Px-Pl* андезибазальтов, 4 – лавы *Px-Pl±Ol* андезибазальтов, 5 – экструзивные лавы *Hbl-Pl* андезитов, 6 – реконструированные эруптивные центры (1 – Центальный, 2 – Западный, 3 – Байдарный, 4 – Южный);

Молодой Шивелуч и экструзии группы Каран: 7 – лавы *Ol-Cpx-Pl±Hbl* андезибазальтов и андезитов, реже гетеротакситовые лавы, 8 – экструзивные лавы *Hbl-Pl* и *Hbl-Px-Pl*, реже *Ol-Hbl±Pl* андезитов, 9 – проксимальные пирокластические отложения.

Другие обозначения: 10 – блок осадочных пород фундамента; 11 – дайки; 12 – морены позднеплейстоценового оледенения; 13 – аллювиально-пролювиальные отложения подножий; 14 – современные ледники; 15 – граница обвального кратера; 16 – обвальные отложения; 17а – современный кратер, 17б – фрагменты ранних кратеров Молодого Шивелуча, 18 – граница распространения отложений катастрофического извержения 1964 г.

ГЛАВА 3. ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ ПОРОД

3.1. Петрографическая характеристика и типизация пород различных временных этапов формирования вулканического массива

Породы вулканического массива имеют порфировые и серийно-порфировые структуры и содержат от 10 до 40-50 об.% вкрапленников. Наименьшее количество вкрапленников характерно для пемз плинианских извержений Молодого Шивелуча, наибольшее зафиксировано в экструзивных лавах. Главными минералами-вкрапленниками являются оливин (Ol), клинопироксен (Cpx), ортопироксен (Opx), плагиоклаз (Pl) и роговая обманка (Hbl). В подчиненном количестве, часто в виде включений во вкрапленниках присутствуют оксиды (хромистая шпинель (CrSp) в оливинсодержащих примитивных разностях пород, титаномагнетит и магнетит (Ti-Mt и Mt) – в более дифференцированных породах) и апатит. В составе пород начальной фазы деятельности и лавового комплекса Старого Шивелуча преобладает пять основных разностей: *Px-Pl±Hbl*, *Px-Hbl-Pl* и *Hbl-Pl* андезиты; *Ol-Cpx-Pl* и *Px-Pl±Ol* андезибазальты. В составе лавового комплекса Молодого Шивелуча и экструзий группы Каран развиты как сходные петрографические разности, так и породы, сочетающие промежуточный набор фенокристаллов: *Ol-Px-Pl±Hbl* андезибазальты и андезиты, *Ol-Hbl±Pl* андезиты. Среди пород лавового комплекса Молодого Шивелуча были найдены гетеротакситовые разности, в которых в матриксе *Ol-Px-Pl* андезибазальта присутствуют крупные полосы, заливы и мельчайшие обособления *Hbl-Pl* андезита.

Немногочисленную, но важную группу составляют породы, в которых плагиоклаз отсутствует или же находится в малом количестве в виде субфенокристаллов. Минеральная ассоциация этих пород представлена оливином и амфиболом при подчиненной и переменной роли клинопироксена. К этим редким породам относятся *Ol-Cpx-Hbl* андезибазальты, *Hbl* андезиты Старого Шивелуча и *Ol-Hbl* андезиты и *Ol-Cpx-Hbl±Phl* базальты Молодого Шивелуча. По минеральным и текстурным особенностям эти породы близки к породам лампрофирового ряда.

Петрографические особенности включений и ксенолитов, которые обильны в породах вулканического массива, рассмотрены по литературным данным (Меняйлов, 1955; Мелекесцев и др., 1991; Колосков, 1999; Bryant et al., 2007) и дополнены новыми наблюдениями по петрографии включений в лавах растущего экструзивного купола.

3.2. Состав породообразующих минералов

Плагиоклаз является преобладающим минералом-вкрапленником большинства разностей пород. Состав ядер варьирует от An_{90} до An_{30} . Для фенокристаллов плагиоклаза в породах Молодого Шивелуча и *Ol-Cpx-Pl* андезибазальтах Старого Шивелуча типичны сложная зональность, неоднородные текстуры, резорбированные ядра или промежуточные зоны. Плагиоклазы *Px-Pl±Ol* андезибазальтов Байдарного отрога выделяются из всей серии изученных пород преобладающей нормальной зональностью.

Фенокристаллы **амфибола** присутствуют во всех разностях пород вулканического массива – от единичных полностью или частично опациitized зерен в андезибазальтах до 20-25 % в наиболее дифференцированных экструзивных лавах. Паргаситовая и магнезиальная роговая обманка являются преобладающими типами амфиболов. Кристаллы магнезиальной

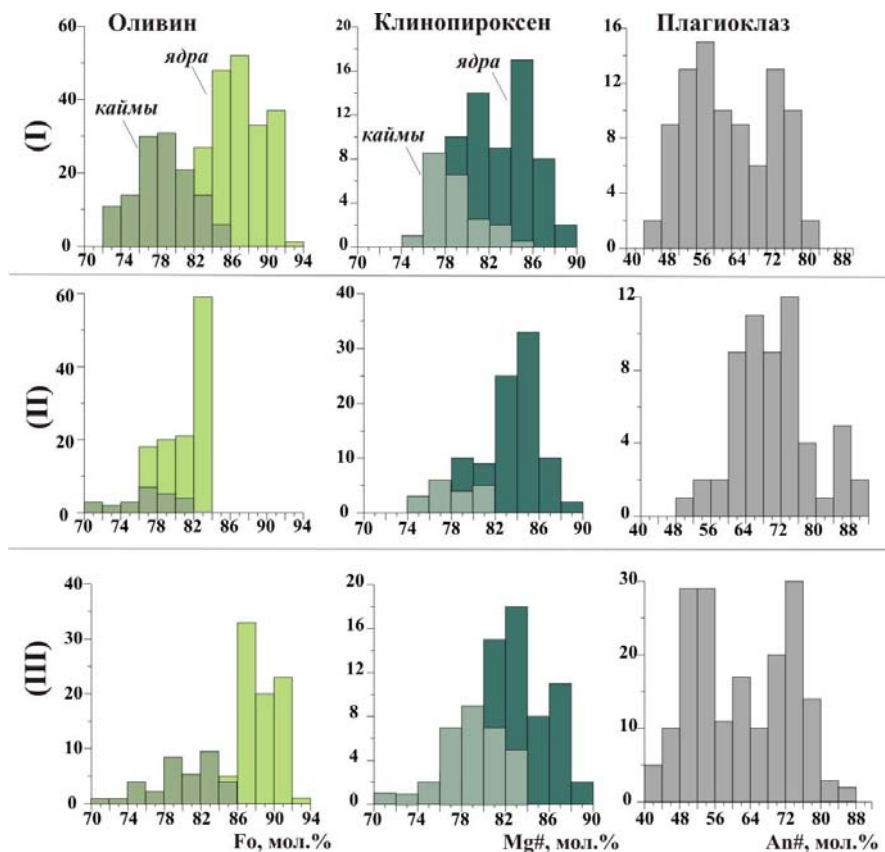


Рис. 2. Состав фенокристаллов оливина, клинопироксена и плаггиоклаза в различных петрографических типах пород вулканического массива Шивелуч. (I) – *Ol-Cpx-Pl* андезибазальты Старого Шивелуча; (II) – *Px-Pl±Ol* андезибазальты Байдарного отрога; (III) – *Ol*-содержащие андезибазальты и андезиты Молодого Шивелуча.

близки к составу этого минерала в породах Ключевского вулкана (Хубуная и др., 1993). Отличительной особенностью состава клинопироксенов как позднплейстоценовых, так и голоценовых *Ol-Cpx-Pl* андезибазальтов является четко проявленная бимодальность по величине $Mg\#$ (рис. 2). Для клинопироксенов *Px-Pl±Ol* андезибазальтов Байдарного отрога, напротив, характерно нормальное распределение составов. Зональность большинства фенокристаллов прямая и выражена в снижении $Mg\#$, Cr и повышении концентраций Al и Ti от центра к краю зерен. Обратная зональность встречается редко и зафиксирована только в ранних лавах Молодого Шивелуча (ядра $Mg\#$ 76-78, краевые зоны $Mg\#$ 83-85).

Ортопироксен состава $En_{67-74}Fs_{30-24}Wo_{3-5}$ во всех типах пород количественно подчинен клинопироксену. Фенокристаллы и микролиты ортопироксена характеризуются невысокой магнезиальностью ($Mg\#$ 69-77). Высокомагнезиальный ортопироксен ($Mg\#$ 80-85) был встречен только в реакционных каймах вокруг оливина. В андезитовых лавах Молодого Шивелуча ортопироксен иногда обнаруживает обратную зональность.

Фенокристаллы **оливина** составляют 7-10 % в *Ol-Cpx-Pl* андезибазальтах и 0-3% в *Px-Pl±Ol* андезибазальтах Старого Шивелуча. В позднплейстоценовых андезитах оливин редок, в андезитах же голоценового возраста отмечается повсеместно как в виде единичных корродированных кристаллов, заключенных в *Px-Nbl-Mt* реакционную кайму, так и в виде идиоморфных вкрапленников.

роговой обманки часто гетерогенны по составу, что выражается в вариациях $Mg\#$, Ti , Na , и Al в центральных и краевых частях зерен. В лавах современных извержений Молодого Шивелуча зафиксированы амфиболы с высоко- и низкоглиноземистым составом ядер.

Клинопироксен – второй по распространённости вкрапленник в андезибазальтовых разновидностях пород. По составу отвечает диопсиду и авгиту $Wo_{44-45}En_{42-48}Fs_{6-11}$, в андезитах эволюционирует до субкальциевого авгита и пижонита $Wo_{39-40}En_{44-45}Fs_{15-16}$. По содержаниям Al , Ti , Na и Cr клинопироксены Шивелуча

Состав ядер фенокристаллов варьирует от $Fo_{92.7}$ до $Fo_{76.3}$. В *Ol-Cpx-Pl* андезибазальтах Старого Шивелуча отчетливо выражены две генерации оливина, которые имеют состав Fo_{92-90} и Fo_{88-84} . Наиболее железистые оливины Fo_{84-76} характерны для *Px-Pl±Ol* андезибазальтовых лав Байдарного отрога. Оливины всех типов пород характеризуются прямой зональностью, которая выражена в снижении магнезиальности, содержаниях Ni и Cr и повышении концентраций Ca и Mn к краям зерен.

Отличительной особенностью состава наиболее магнезиальных ($>Fo_{89}$) оливинов вулканического массива являются высокие (до 0.53 мас. %) содержания Ni. Содержания CaO в ядрах фенокристаллов варьируют от 0.05 до 0.13 мас. %.

Включения хромистой шпинели (с преобладающим составом $Cr\#=60-76$, $Mg\#=30-60$, $Fe^{2+}/Fe^{3+}=3.5-1$) обильны в магнезиальных оливинах *Ol-Cpx-Pl* андезибазальтов Старого Шивелуча и оливинсодержащих породах Молодого Шивелуча. В более железистых оливинах *Px-Pl±Ol* андезибазальтовых лав Байдарного отрога редко встречающаяся шпинель имеет $Cr\#=49-56$, $Mg\#=29-37$, $Fe^{2+}/Fe^{3+}=1.07-1.41$, $TiO_2=1.6-2.6$ мас. %, $Al_2O_3=13.6-19.1$ мас. %. Сосуществующие шпинель и наиболее магнезиальный оливин (рис. 3) отвечают по составу мантийной ассоциации этих минералов (Arai, 1994), что свидетельствует об их кристаллизации из примитивных расплавов, близких исходным мантийным магмам.

3.3. Общие закономерности петрографии пород и порядок кристаллизации

Петрографические и минералогические данные показывают, что в строении вулканического массива участвует близкая по минеральному составу и текстурно-структурным особенностям серия пород среднего состава, связанная с деятельностью единого магматического источника. Высокая магнезиальность оливина (до $Fo_{92.7}$), основной состав плагиоклазов (до An_{90}) и ранняя кристаллизация амфибола являются отличительными особенностями состава минералов андезибазальтовых и андезитовых пород Шивелуча. Порфиновые структуры пород, присутствие нескольких генераций вкрапленников темноцветных минералов (*Ol*, *Cpx*, *Hbl*), дискретные вариации составов плагиоклаза и его контрастная зональность свидетельствуют о многостадийной истории кристаллизации магм, проявлении процессов кумуляции кристаллов и смешения магм в условиях промежуточных магматических камер. Наиболее отчетливо петрографические признаки гибридного происхождения проявлены в *Ol-Cpx-Pl* лавах Старого Шивелуча и в большинстве разностей пород Молодого Шивелуча.

Петрографические особенности пород и характер статистического распределения состава фенокристаллов предполагают последовательность

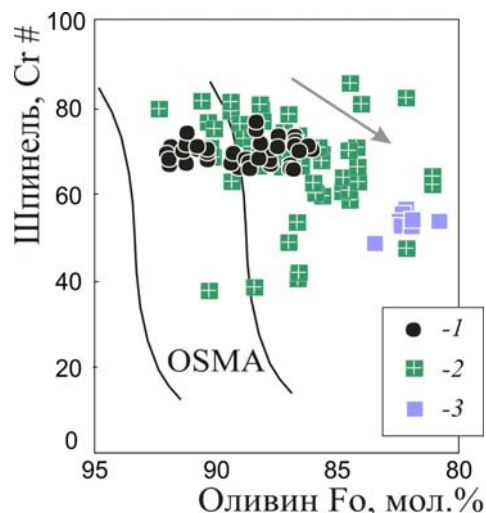


Рис. 3. Состав шпинелей в различных типах пород: 1 – *Ol*-содержащие андезибазальты и андезиты Молодого Шивелуча; 2 – *Ol-Cpx-Pl* андезибазальты Старого Шивелуча; 3 – *Px-Pl±Ol* андезибазальты Байдарного отрога. Стрелкой показано направление эволюции составов минералов при кристаллизации магм. OSMA – поле мантийного оливин-шпинелевого парагезиса (Arai, 1994).

кристаллизации серии пород вулканического массива, предположительно отвечающей трем уровням глубинности. Наиболее ранний этап кристаллизации при подъеме магм от места их генерации до промежуточного очага представлен ликвидусной ассоциацией оливина Fo_{90-92} и хромистой шпинели. Следующий этап кристаллизации андезибазальтовых магм в промежуточном коровом очаге фиксирует ассоциация вкрапленников Fo_{89-88} , An_{86-85} и $SrxMg_{88-89}$. На этом же этапе начинается кристаллизация паргаситового амфибола, в ядрах которого иногда отмечаются реликты клинопироксена $Mg\# 85-87$ и оливина Fo_{86-88} . Поздний этап кристаллизации в условиях близповерхностной магматической камеры представлен устойчивой ассоциацией плагиоклаза и магнезиальной роговой обманки, которая наблюдается в большинстве экструзивных лав Молодого Шивелуча и пирокластических пород НФД.

В отличие от большинства пород вулканического массива, минералогические особенности которых свидетельствуют о многостадийной кристаллизации в изменяющихся физико-химических условиях, состав минералов и петрографические особенности $Px-Pl\pm Ol$ андезибазальтов Байдарного отрога указывают на то, что их кристаллизация происходила в условиях монотонного снижения температуры и давления. Об этом свидетельствуют преобладающая прямая зональность вкрапленников плагиоклаза, клинопироксена и распад немногочисленных вкрапленников амфибола.

ГЛАВА 4. ГЕОХИМИЯ ПОРОД

В начале главы приведено описание аналитических методов, использованных для геохимической и изотопной характеристики пород (раздел 4.1).

4.2. Главные элементы

Продукты различных временных этапов деятельности вулканического массива представлены известково-щелочной умеренно-калиевой серией пород среднего состава ($SiO_2=53.5-63.8$ мас. %, $FeO^*/MgO=0.8-1.5$, $K_2O=0.73-1.67$ мас. %; рис. 4 а,б). Из проанализированных в работе 106 образцов лав и данных по химическому составу пирокластических отложений Молодого Шивелуча (Ponomareva et al., 2007) только три разновидности пород имеют основной состав. Эти редкие породы

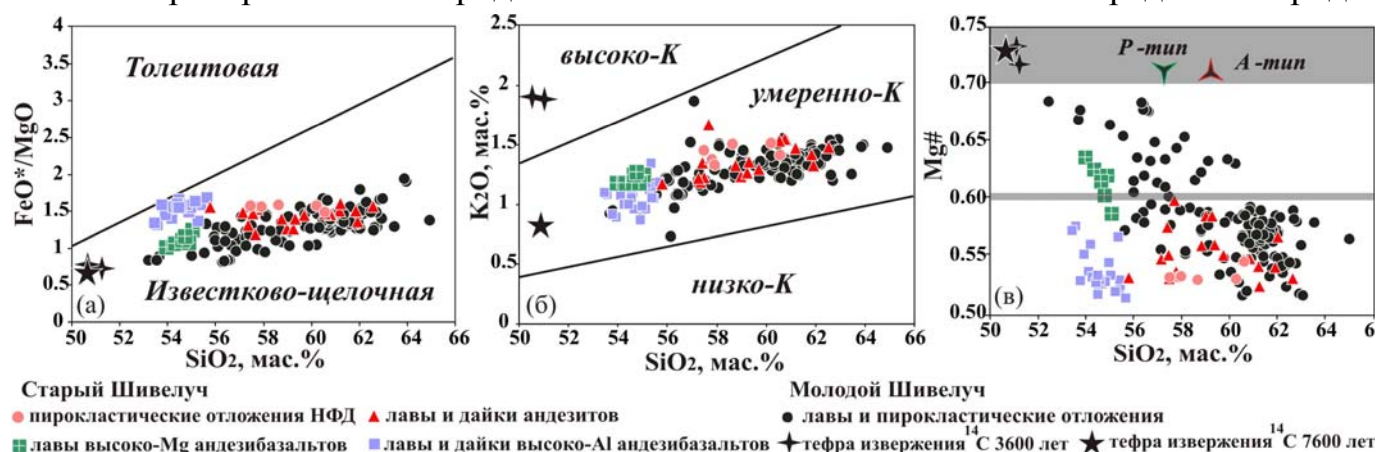


Рис. 4. Классификационные диаграммы для пород вулканического массива Шивелуч. Горизонтальная линия на диаграмме (в) разделяет область высоко-магнезиальных ($Mg\#=0.6-0.7$) и умеренно-магнезиальных ($Mg\#=0.5-0.6$) составов; серая заливка ограничивает область примитивных ($Mg\#>0.7$) пород, которые могут находиться в равновесии с мантийным ($Fo >90$) оливином. Средние составы примитивных андезитов Командорского блока (А-тип) и вулкана Пийпа (Р-тип) согласно (Ygodzinski et al., 1994, 1995).

представлены, во-первых, высоко-К *Ol-Cpx-Hbl±Phl* базальтами ($\text{SiO}_2=50.6-51.1$; $\text{K}_2\text{O}=1.9-2$ мас. %, $\text{Mg}\#=0.70-0.71$), которые описаны как в голоценовых пирокластических разрезах в виде прослоев тефры с возрастом 3600^{14}C лет (далее по тексту базальт 3600^{14}C), так и в виде единичной находки в составе лавового комплекса Молодого Шивелуча; и, во-вторых, умеренно-К базальтами ($\text{SiO}_2=51.5-52.0$; $\text{K}_2\text{O}=0.95-1.16$ мас. %, $\text{Mg}\#=0.69-0.71$), установленными в виде прослоев тефры с возрастом 7600^{14}C лет (далее по тексту базальт 7600^{14}C) (Волынец и др., 1997; Чурикова и др., 2010).

В постройке Старого Шивелуча пород с содержанием $\text{SiO}_2 < 53.5$ мас. % и $\text{Mg}\# > 0.64$ не обнаружено. Породы с содержанием кремнезема более 64 % также встречаются исключительно редко. К примеру, пемза, отвечающая по составу дациту, зафиксирована только для Молодого Шивелуча при извержении 7700^{14}C лет (Ponomareva et al., 2007).

Все породы вулканического массива характеризуются умеренной и высокой магнезиальностью, которая варьирует от 0.52 до 0.72 (рис. 4в). Среди пород, слагающих постройку Старого Шивелуча, преобладают умеренно-магнезиальные андезиты и андезибазальты $\text{Mg}\#=0.52-0.59$, высокомагнезиальные андезибазальты с $\text{Mg}\#\geq 0.60$ распространены ограниченно и занимают резко подчиненный объем. Среди пород голоценового и современного периода активности вулкана доля высокомагнезиальных разновидностей больше (рис. 4в.) *Px-Pl±Ol* андезибазальты Байдарного отрога по величине коэффициента глиноземистости ($al'=1.26-1.4$) относятся к высокоглиноземистым породам.

По содержанию большинства главных элементов, за исключением Ca, Na и K наиболее магнезиальные породы вулканического массива близки составам магнезиальных базальтов Ключевского вулкана (рис. 5), которые относятся к числу

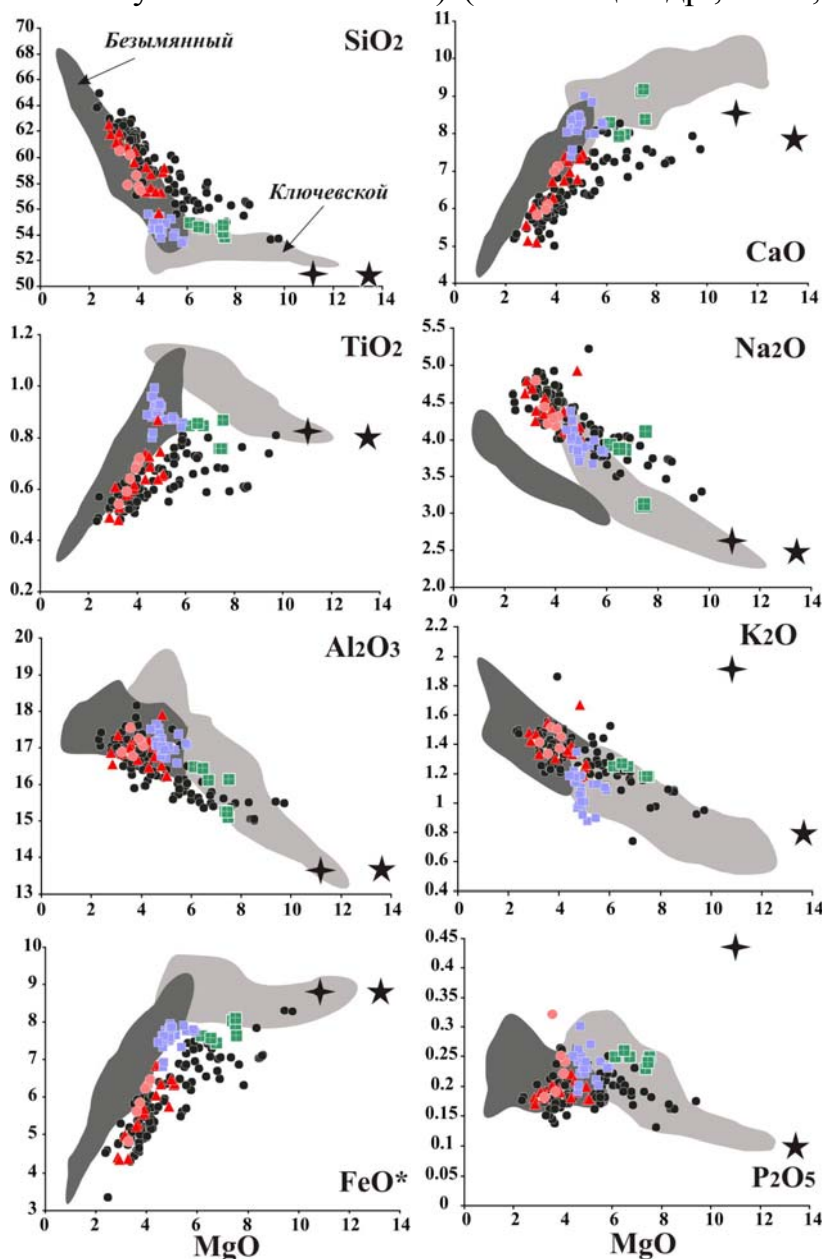


Рис. 5. Диаграммы распределения содержаний главных элементов в породах вулканического массива Шивелуч. Составы пород вулканов Ключевской и Безымянный по данным (Almeev et al., 2013; Portnyagin et al., 2007). Условные обозначения см. на рис. 4.

наиболее примитивных вулканических пород четвертичного возраста, известных на Камчатке (напр., Хубуная и др., 1993; Volynets, 1994; Portnyagin et al., 2007). В области менее магнезиальных составов породы вулканического массива Шивелуч отличаются от пород Ключевского вулкана меньшими содержаниями TiO_2 , Al_2O_3 , FeO^* , CaO и повышенными SiO_2 и Na_2O .

4.3. Редкие и редкоземельные элементы

Максимальные концентрации Cr (до 700-800 г/т) и Ni (до 180-200 г/т) зафиксированы в базальтах 3600 и 7600 ^{14}C (рис. 6). При понижении содержания MgO до ~5 мас.% породы позднплейстоценового этапа формирования вулканического массива резко обедняются этими компонентами (рис.6) и в целом следуют тренду андезибазальтов и андезитов вулканов Ключевской и Безымянный. Породы Молодого Шивелуча во всем интервале содержаний MgO обогащены Cr и Ni по сравнению с породами Старого Шивелуча.

Высокие содержания Sr являются характерной особенностью всех пород массива Шивелуч. По сравнению с породами Ключевского и Безымянного вулканов (рис. 6) при близких содержаниях MgO и SiO_2 породы Шивелуча обогащены стронцием в ~1.5 раза ($Sr=451-654$ г/т). Аномально обогащены стронцием два образца – лавы г. Каран (обр. 7449, $Sr=1008$ г/т) и породы дайки *Hbl* андезитов, расположенной в 100 м восточнее данной экструзии (обр.7448, $Sr=1037$ г/т). Содержания Ba, Rb и Zr в породах сходной магнезиальности для Шивелуча и Ключевского вулкана близки. Содержания Ba, Rb и Zr увеличиваются во всех типах пород вулканического массива по мере снижения MgO. Породы Молодого Шивелуча несколько обогащены Ba по сравнению с породами Старого Шивелуча. Среди всех пород вулканического массива аномальным обогащением Ba (до 475 г/т), Rb (до 41 г/т) выделяются высоко-К

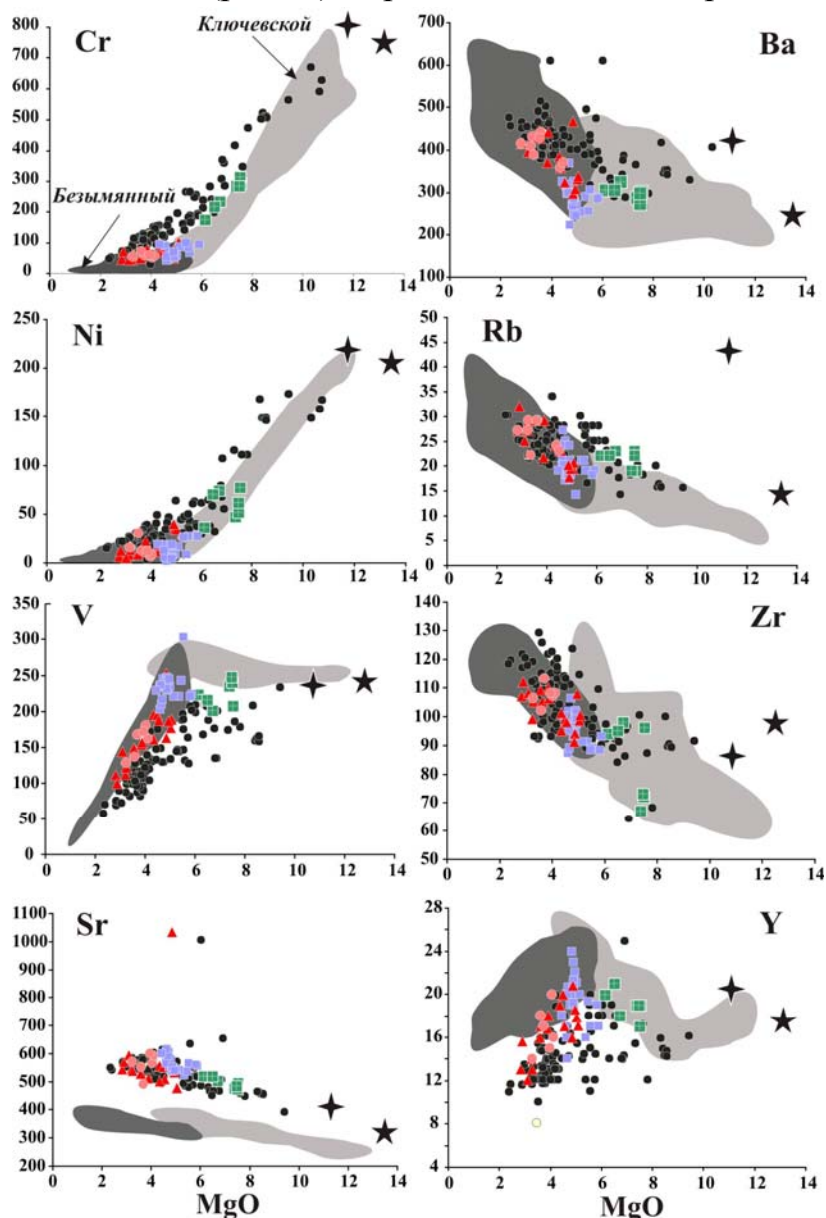


Рис. 6. Диаграммы распределения содержаний редких элементов в породах вулканического массива Шивелуч. Составы пород вулканов Ключевской и Безымянный по данным (Almeev et. al., 2013; Portnyagin et al., 2007). Условные обозначения см. на рис. 4.

магнезиальности для Шивелуча и Ключевского вулкана близки. Содержания Ba, Rb и Zr увеличиваются во всех типах пород вулканического массива по мере снижения MgO. Породы Молодого Шивелуча несколько обогащены Ba по сравнению с породами Старого Шивелуча. Среди всех пород вулканического массива аномальным обогащением Ba (до 475 г/т), Rb (до 41 г/т) выделяются высоко-К

базальты 3600^{14}C . Умереннокалиевые базальты 7600^{14}C , напротив, обнаруживают наиболее низкие концентрации этих элементов среди всех изученных пород ($\text{Ba}=238\text{-}242$, $\text{Rb}=16$ г/т). Содержания Y в породах вулканического массива варьируют от 8 до 25 г/т и в целом несколько понижены в породах Молодого Шивелуча. В интервале MgO от 10 до 5 мас. % концентрации Y варьируют несистематично. В породах с содержанием MgO ≤ 5 мас. % наблюдается резкое снижение содержания этого элемента. Наиболее низкие значения зафиксированы в самых дифференцированных породах (например, обр. 7433, извержение 2004 г., Y=8 г/т).

Содержания редких элементов, нормированные на содержания N-MORB, для пород разных возрастных этапов вулканического массива имеют близкие спектры и показывают типичное для островодужных вулканитов обогащение крупноионными литофильными элементами (Cs, K, Rb, Ba, Sr), легкими РЗЭ, обеднение высоко-зарядными элементами (Nb, Ta) и тяжелыми РЗЭ (рис. 8а). Спектры РЗЭ дифференцированы ($[\text{La}/\text{Yb}]_n=2.8\text{-}6.5$, $[\text{La}/\text{Sm}]_n=1.1\text{-}2.4$) и субпараллельны для пород различных этапов формирования вулканического массива (рис. 7б,в). Характерной особенностью этих спектров является умеренное фракционирование легких РЗЭ ($[\text{La}/\text{Nd}]_n=1.1\text{-}1.6$), сильное фракционирование средних РЗЭ ($[\text{Nd}/\text{Dy}]_n=2.1\text{-}3.6$) и слабое фракционирование в области тяжелых РЗЭ ($[\text{Dy}/\text{Yb}]_n=1.0\text{-}1.3$). Андезиты позднеллейстоценового и голоценового этапов развития вулкана демонстрируют различное обогащение редкими землями – породы Молодого Шивелуча несколько обеднены РЗЭ ($\sum\text{РЗЭ}=39.9\text{-}53.7$ г/т) в сравнении с лавами и

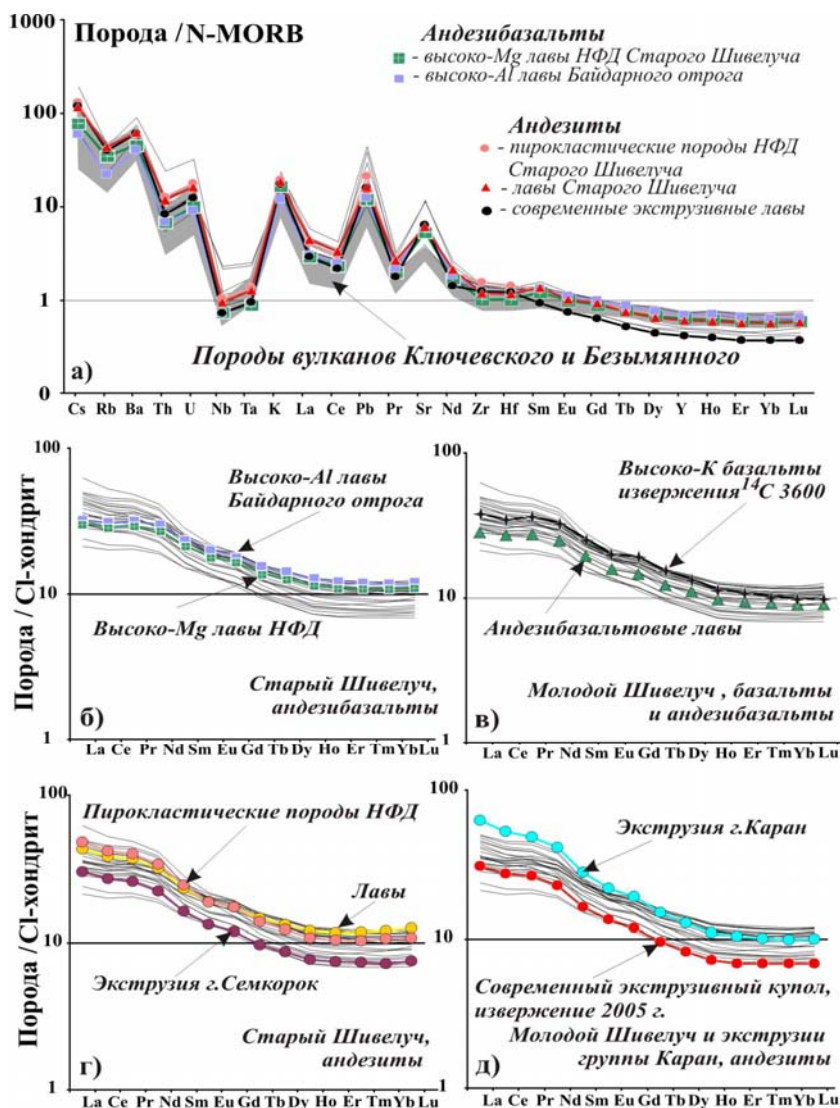


Рис. 7. Распределение редких и редкоземельных элементов в породах вулканического массива Шивелуч: (а) – спектры редких элементов, нормированные к составу N-MORB, составы пород вулканов Ключевского и Безымянного по (Almeev et al., 2013); (б-г) – содержания РЗЭ, нормированные на CI-хондрит в андезибазальтах (б и в) и андезитах (г и д) различных этапов формирования вулканического массива. Серые линии на всех рисунках показывают составы индивидуальных образцов. Концентрации элементов в N-MORB и CI-хондрите по (Sun and McDonough, 1989).

пирокластикой Старого Шивелуча ($\Sigma PЗЭ=46.6-73.1$ г/т). Исключение из этой закономерности представляют лавы экструзии г. Каран (голоцен), которые имеют наибольшее обогащение РЗЭ ($\Sigma PЗЭ$ до 86.3 г/т) и другими сильно-несовместимыми элементами (Th, U, Ba, K) среди всех изученных пород. Концентрации тяжелых РЗЭ (Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) во всех разностях пород обратно коррелируют с содержанием SiO_2 . Наименьшие концентрации тяжелых РЗЭ (например, Yb=1.11 г/т) характерны для наиболее дифференцированных пород с содержанием $SiO_2 > 60$ мас. %.

4.4. Отношения несовместимых элементов

Породы вулканического массива в большей степени обогащены Cs, Rb, Ba, K, Pb, Sr, U, Th, легкими РЗЭ и обеднены тяжелыми РЗЭ и Y по сравнению с серией пород вулканов Ключевской и Безымянный (рис. 8), что отражается на величине индикаторных отношений несовместимых элементов. Породы Шивелуча имеют в среднем более высокие отношения La/Sm, Pb/Ce, Th/La, La/Nb, Sr/Y и относительно пониженные Ba/Th и Ba/La (рис. 9). Такие особенности пород Шивелуча согласуются с предполагаемым в ряде работ большим вкладом расплавов из субдуцирующей плиты в их источник по сравнению с вулканами Ключевской группы (напр., Волинец и др., 2000; Yagodzinski et al., 2001; Churikova et al., 2001; Münker et al., 2004).

Ряд отношений несовместимых элементов, обычно не фракционирующих при кристаллизационной дифференциации магм в силу крайне низких (< 0.01) валовых коэффициентов распределения, показывают отчетливые корреляции с содержанием SiO_2 в магмах, например: Th/La (положительная корреляция, рис. 8в) и Nb/Ta (отрицательная корреляция, рис. 8г). Такие зависимости указывают на вероятность влияния коровой ассимиляции на состав магм Шивелуча.

4.5. Изотопная систематика Sr и Nd

Отношения изотопов Sr и Nd были определены в представительных образцах, которые характеризуют различные временные этапы формирования вулканического массива. Для Sr-Nd характеристики базальтов 3600 ^{14}C были использованы данные (Portnyagin et al., 2007). Отношения изотопов стронция $^{87}Sr/^{86}Sr$ в породах Шивелуча

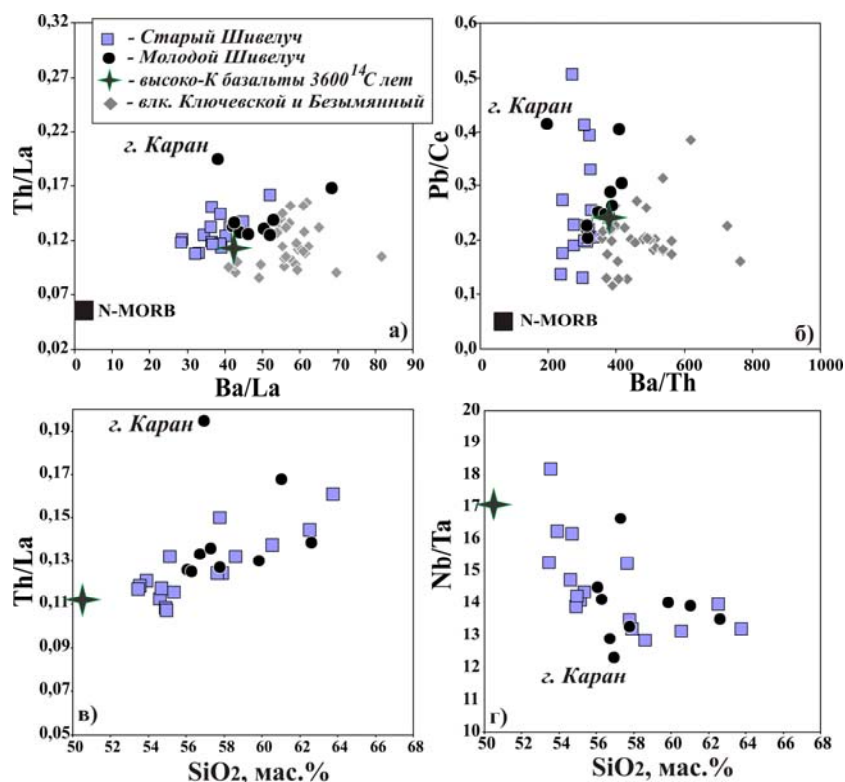


Рис. 8. Вариации отношений несовместимых элементов в породах вулканического массива Шивелуч. Составы N-MORB согласно (Sun and McDonough, 1989), составы пород вулканов Ключевского и Безымянного по данным (Portnyagin et al., 2007; Almeev et al., 2013).

(Portnyagin et al., 2007; Almeev et al., 2013).

изменяются от 0.703215 до 0.703676, вариации отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ составляют 0.513123-0.513045, что отвечает $\epsilon\text{Nd}=9.5-7.9$.

Породы Старого и Молодого Шивелуча имеют близкие интервалы изотопных отношений Sr и Nd, которые типичны для четвертичных вулканитов Камчатки и занимают область перекрытия трех вулканических зон полуострова (рис. 9а). По сравнению с породами вулканов Ключевской и Безымянный породы Шивелуча характеризуются более низкими значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ при близких значениях $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (рис. 9а). Отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в породах вулканического массива имеют тенденцию к положительной корреляции с содержанием SiO_2 (рис. 9б) и обнаруживают отчетливую прямую зависимость с содержаниями калия (рис. 9в).

ГЛАВА 5. УСЛОВИЯ ЭВОЛЮЦИИ МАГМ

5.1. Происхождение исходных магм вулканического массива

Высокомагнезиальный состав минералов в базальтах и андезибазальтах (рис. 3) свидетельствует о мантийном происхождении исходных магм, формировавших серию пород вулканического массива Шивелуч. Комплекс полученных данных по петрографии, составу породообразующих минералов и геохимии не позволяет рассматривать андезиты и андезибазальты Шивелуча в качестве производных примитивных андезитовых магм, таких, к примеру, как андезиты Командорского блока (А-тип андезитов, Yagodzinski et al., 1995) или вулкана Пийпа (Р-тип андезитов, Yagodzinski et al., 1994) в пределах Западных Алеут. Геохимические спектры пород свидетельствуют о генетическом родстве преобладающих пород среднего состава и редко

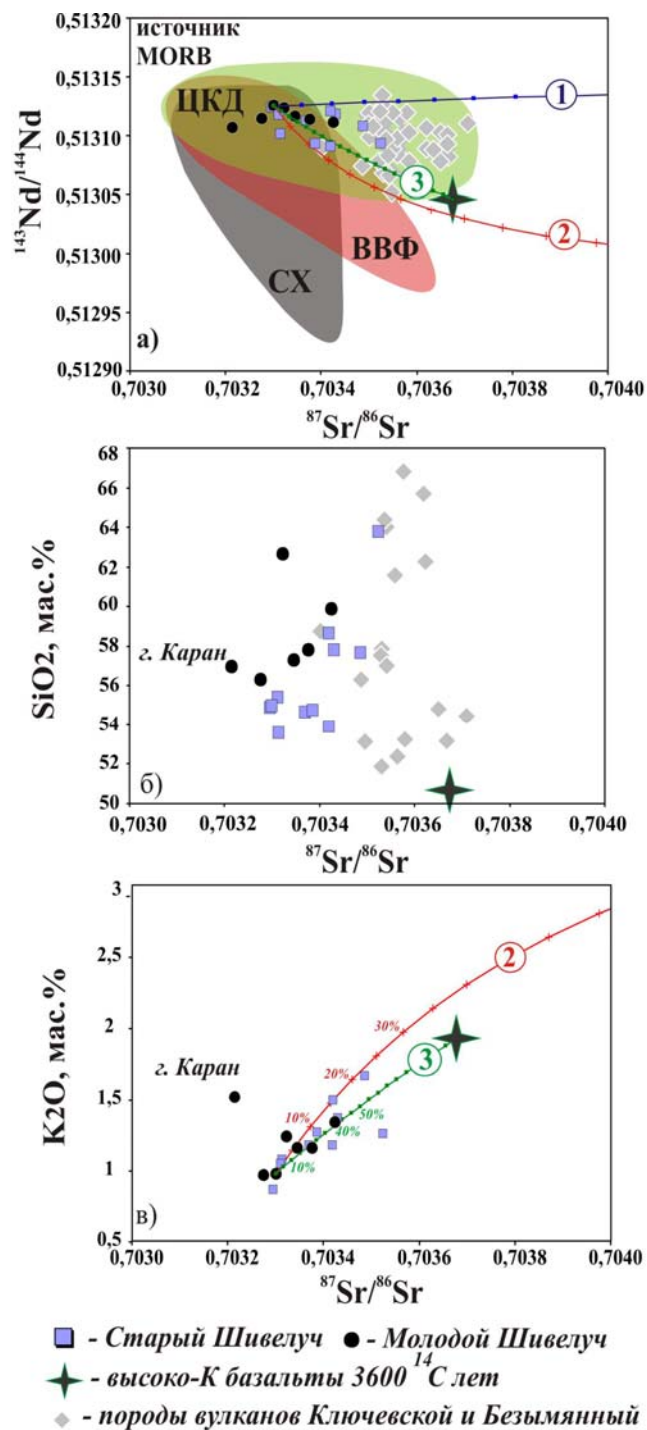


Рис. 9. Sr-Nd систематика пород вулканического массива Шивелуч. Поля изотопных составов вулканических зон Камчатки (CX – Срединный хребет; ВВФ – Восточный вулканический фронт; ЦКД – Центрально-Камчатская депрессия) согласно (Churikova et al., 2001). На рис. (а) и (в) показаны возможные тренды ассимиляции пород фундамента – метаморфических пород верхней (линия 1) и нижней (линия 2) толщ Хавывенской серии и тренд смешения с мантийными высоко-К базальтами (линия 3). Состав пород Хавывенской серии приведен по данным (Тарарин и др., 2007).

поступающих на поверхность высокомагнезиальных магм базальтового и андезибазальтового состава. В качестве вероятной родоначальной магмы может рассматриваться состав базальтовой тефры 7600 ^{14}C (Волынец и др., 1997; Ponomareva et al., 2007), который характеризуется максимальными содержаниями мафических компонентов (Mg, Fe, Cr, Ni) и минимальными содержаниями несовместимых литофильных компонентов (K, Rb, Ba) во всей серии пород вулканического массива, а также содержат оливин $\text{Fo}_{92.3}$, который может находиться в равновесии с первичными мантийными магмами.

По данным ряда работ (Hochstaedter et al., 1996; Dorendorf et al., 2000; Portnyagin et al., 2005; 2007; Plank et al., 2005) состав мантии под ЦКД отвечает слабоистощенному источнику MORB с $\text{La/Sm} \sim 1$ и изотопными отношениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \leq 0.7030$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \sim 0.5131$. Повышенные значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, обогащение примитивных пород Шивелуча крупноионными (K, Sr, Ba) и редкоземельными (ЛРЗЭ) литофильными элементами по сравнению с MORB (рис. 7-9) указывают на участие в процессах генерации магм геохимически обогащенного компонента (вероятно, водосодержащего расплава, Portnyagin et al., 2007) субдукционного происхождения. Источником этого компонента, способным объяснить геохимические особенности родоначальных магм Шивелуча, могут быть субдуцируемые гидротермально измененная океаническая кора и океанические осадки (напр., Churikova et al., 2001).

Особенностью примитивных магм Шивелуча является их изотопно-геохимическая гетерогенность и присутствие примитивных высоко-К базальтов 3600 ^{14}C , которые выделяются из всей серии пород вулканического массива максимальным обогащением Rb, Ba и имеют наиболее высокие отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и низкие отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Для объяснения происхождения этих базальтов в работах (Волынец и др., 1997; Portnyagin et al., 2007) предполагалось участие метасоматизированной литосферной мантии. Как показано на рис. 9в, вариации изотопных отношений Sr, Nd и содержаний K_2O в типичных породах Шивелуча могут быть объяснены участием до 50% компонента, отвечающего по составу высоко-К базальту 3600 ^{14}C . Таким образом, вероятной моделью образования исходных магм Шивелуча может быть плавление мантийного клина под воздействием водосодержащего расплава из субдуцированной плиты и последующее взаимодействие мантийных магм с обогащенной литосферной мантией.

5.2. Эволюция магм в коровых условиях

5.2.1. Кристаллизационная дифференциация

Единые тренды составов пород Шивелуча на графиках вариаций содержаний главных и редких элементов относительно MgO (рис. 6, 7) и закономерные изменения состава породообразующих минералов указывают на важную роль фракционной кристаллизации в формировании пород. Понижение CaO, FeO, MnO, TiO_2 , Cr, Ni, V и увеличение SiO_2 , Na_2O , K_2O , Rb, Ba с уменьшением MgO в породах отражает кристаллизацию железо-магниевого силикатов и оксидов: парагенезис $\text{Ol} \pm \text{Sp} + \text{Cpx}$ в андезибазальтовых лавах сменяется на парагенезис $\text{Hbl} \pm \text{Px} + \text{Mt}$ в андезитах. Появление апатита на ликвидусе фиксируется по излому тренда P_2O_5 при уменьшении MgO до 4-5 мас. %. Далее в работе рассмотрены особенности кристаллизации магм Шивелуча в коровых условиях.

5.2.2. Роль кумуляции плагиоклаза

Плагиоклаз является преобладающей минеральной фазой большинства пород вулканического массива. Накопление Al_2O_3 и Sr с повышением SiO_2 и с уменьшением MgO в породах (рис. 5 и 6) находится в противоречии с большим количеством кристаллизующегося плагиоклаза и данными по составу расплавных включений в андезитах, в которых содержания Sr не превышают 360 г/т и обратно коррелируют с SiO_2 (Толстых и др., 2003; Humphreys et al., 2008). Данный факт свидетельствует о том, что процессы кумуляции кристаллов плагиоклаза оказывали влияние на валовый состав пород, поддерживая содержание Al_2O_3 и Sr в магмах на более высоком уровне, чем в равновесном расплаве на каждом последующем этапе фракционирования. Резкая и разнообразная по типу зональность в плагиоклазах свидетельствует в пользу такой модели и предполагает долговременное нахождение плагиоклазов в магмах и их взаимодействие с расплавами разного состава.

5.2.3. Роль фракционирования амфибола

Петрографические, минералогические и геохимические данные свидетельствуют о принципиальной роли фракционирования амфибола на различных этапах эволюции магм вулканического массива. Ранняя кристаллизация амфибола приводит к повышению вязкости базальтовых магм с высоким содержанием воды, что затрудняет их подъем к поверхности и способствует накоплению и дифференциации на нижних уровнях коры (Pichavant et al., 2002; Barclay, Carmichael, 2004). На основании этого предполагается, что в районах широкого развития пород среднего состава ассоциирующие с ними базальтоиды доминируют на нижних коровых горизонтах (напр., Annen et al., 2006). В качестве свидетельств такого процесса рассматриваются: 1) присутствие богатых амфиболом включений или ксенолитов в дифференцированных вулканических породах; 2) петрологические и геохимические свидетельства повторного разогрева и плавления обогащенных амфиболом кумулятивных пород и 3) в достаточно редких случаях – поступление на поверхность амфиболсодержащих базальтов (напр., Tierpolo et al., 2007). Все из перечисленных признаков присутствуют в породах вулканического массива Шивелуч. Подавляющее количество включений и ксенолитов в породах вулкана представлено обогащенными амфиболом минеральными парагенезисами вплоть до развития мономинеральных сегрегаций, часто встречающихся в лавах современных извержений. Признаки контактово-реакционного взаимодействия с вмещающими андезитами также характерны для многих включений (напр., Мелекесцев и др., 1991). Немногочисленные находки пород, в которых преобладает *Ol-Hbl* ассоциация вкрапленников, представляют убедительные свидетельства ранней и глубинной кристаллизации амфибола в породах Шивелуча. Отсутствие в таких породах фенокристаллов плагиоклаза указывает на кристаллизацию магм в условиях нижнекоровых давлений при высоком давлении воды (Danyushevsky, 2001). Данные экспериментальных работ (Grove et al., 2003) также указывают на то, что подобная ассоциация высокоглиноземистого амфибола и магнезиального оливина отвечает кристаллизации водонасыщенных базальтовых расплавов в условиях высокого (до 8 kbar) давления. Таким образом, ранняя кристаллизация амфибола, которая приводит к преимущественной кристаллизации водных базальтоидных магм в глубинных условиях, способна объяснить резкое

преобладание андезитов в пределах вулканического массива Шивелуч и ограниченное распространение на поверхности основных пород.

Фракционирование богатой амфиболом минеральной ассоциации на последующих этапах эволюции магм привело к формированию близких к адакитам геохимических особенностей в дифференцированных разностях пород. Высокие, близкие к адакитам, отношения Sr/Y (до 71) и низкие содержания Y (<18 г/т) характерны для дифференцированных пород вулканического массива, что

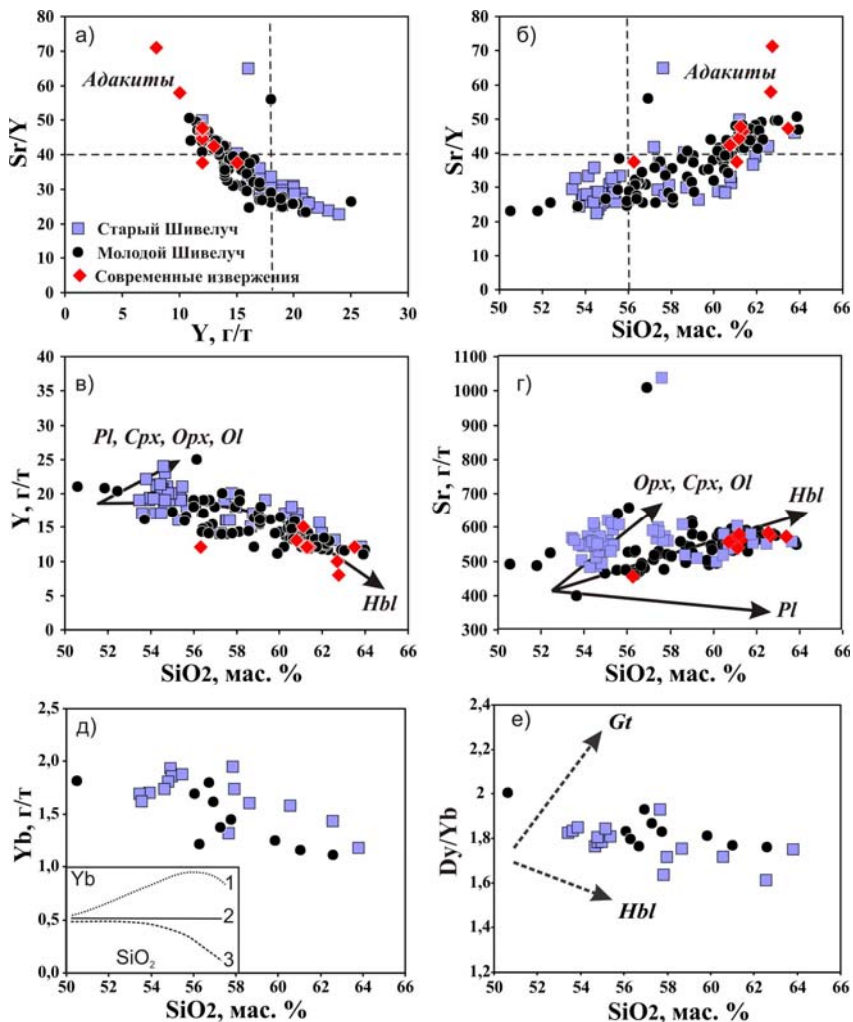


Рис. 10. Систематика содержаний SiO₂, Sr, Y и Yb в породах вулканического массива Шивелуч. По (Горбач, Портнягин, 2011), с дополнениями. Область адакитовых составов (Y < 18 ppm, Sr/Y > 40, SiO₂ > 56 мас. %) на рис. (а) и (б) показана по данным (Defant, Drummond, 1990). Жирными стрелками на рис. (в) и (г) показаны векторы направления изменения состава расплавов при кристаллизации различных фаз. На врезке к рис. (д) показаны тренды изменения Yb при кристаллизации базальтового расплава без амфибола (1) и с амфиболом в условиях нижней коры (2) и верхней и средней коры (3) по данным (Brophy, 2008). На рис. (е) стрелками показаны тренды изменения отношения Dy/Yb, отражающие присутствие граната в источнике и процессы фракционирования амфибола согласно (Davidson et al., 2007).

интерпретируется во многих работах как важное свидетельство участия продуктов плавления субдуцирующей океанической коры в происхождении магм Шивелуча (напр., Yagodzinski et al., 2001; Churikova et al., 2001). Рассмотрение всей серии пород вулканического массива (рис. 10а,б) показывает, что составы пород располагаются в области, переходной между составами типичных островодужных магм (Sr/Y < 40) и породами с адакитовой спецификой (Sr/Y > 100, La/Yb > 20, (Defant and Drummond, 1990)).

Содержания Y, ТРЗЭ, отношения Sr/Y и La/Yb показывают зависимость от MgO и SiO₂ в породах Шивелуча. Такое поведение Y и Yb (рис. 10в,д) при увеличении SiO₂ соответствует фракционированию магм с участием амфибола (Brophy, 2008), который имеет высокие (>1) коэффициенты распределения минерал-расплав для иттрия и тяжелых РЗЭ.

Присутствие граната в рестите является одним из основных критериев

адакитовых магм (Defant and Drummond, 1990, Martin, 2005, и др.). Поскольку фракционирование средних (Dy) и тяжелых (Yb) РЗЭ различно при удалении

амфибола из расплава и в присутствии граната в рестите, для адакитовых составов характерна сильная прямая корреляция Dy/Yb и SiO₂ (Davidson et al., 2007). В породах Шивелуча отношение Dy/Yb имеет слабую отрицательную корреляцию с SiO₂ (рис. 10е) и указывает на фракционирование богатой амфиболом минеральной ассоциации.

5.2.4. Роль смешения магм

Наряду с процессами кристаллизационной дифференциации исходных базальтовых магм процессы смешения примитивных и дифференцированных магм широко распространены в формировании островодужных андезитов (напр., Anderson, 1976; Sakuuama, 1981). Гибридное происхождение пород обычно устанавливается по присутствию неравновесных минеральных парагенезисов, сложной зональности фенокристаллов, обилию корродированных вкрапленников и меланократовых включений, антидромной последовательности извержений (Eichelberger, 1978, 1980; Фролова, Бурикова, 1997; Плечов и др., 2008).

Прямым доказательством процессов смешения является одновременное извержение магм разного состава в виде гетеротакситовых лав (Волынец, 1979). Впервые присутствие гетеротакситовых пемз в пирокластических отложениях Шивелуча было отмечено в работе (Волынец, 1979).

Признаки взаимодействия различных по составу расплавов были зафиксированы и в лавах современных извержений вулкана (Humphreys et al., 2006; Dirksen et al., 2006; Gorbach, 2006). Данные по составу и характеру зональности фенокристаллов, а также геохимические особенности пород Молодого Шивелуча свидетельствуют о том, что процессы смешения магм были характерны для всей голоценовой истории вулкана.

Породы Молодого Шивелуча имеют следующие минералогические признаки гибридного происхождения: дискретные по составу группы ядер фенокристаллов

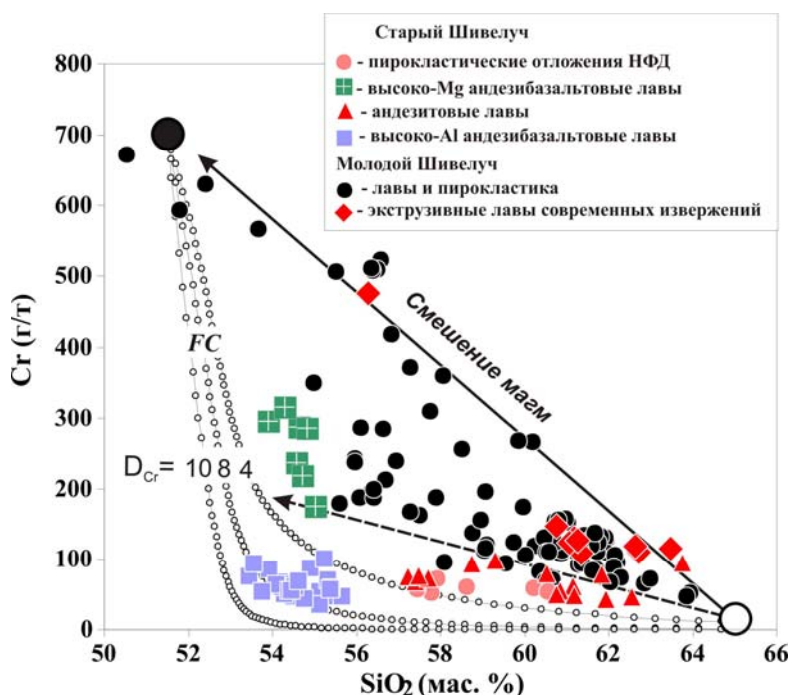


Рис. 11. Систематика содержаний SiO₂ и Cr в породах вулканического массива Шивелуч. По (Горбач, Портнягин, 2011), с дополнениями. Тонкими линиями с кружками показаны модельные тренды фракционной кристаллизации (FC) базальтового расплава с исходным содержанием Cr=700 г/т и SiO₂=51.5 мас. % при различных значениях валового коэффициента распределения (DCr) между минералами и расплавом. Для расчета использована зависимость между содержанием SiO₂ и степенью кристаллизации по данным (Worphy, 2008). Стрелками показаны возможные тренды смешения дифференцированной магмы с SiO₂=65 мас. %, примитивного базальта (сплошная линия) и андезибазальта (пунктирная линия), полученного в результате 35% кристаллизации примитивного расплава. Черный круг отвечает составу примитивного базальта, белый круг обозначает состав дифференцированной магмы с SiO₂=65 мас. %.

плаггиоклаза и амфибола и их резкая зональность; обратная зональность пироксенов, присутствие высокомагнезиального оливина во всех разностях пород и его реакционные взаимоотношения с пироксенами и роговой обманкой.

Геохимический эффект процессов смешения магм наиболее отчетливо проявлен в распределении содержаний Sr и Ni – элементов, концентрации которых особенно контрастны в примитивных и дифференцированных породах. Как показано на графике вариаций содержания Sr в породах относительно SiO₂ (рис. 11), тренд фракционной кристаллизации базальтового расплава имеет строго нелинейную гиперболическую форму и приводит к резкому обеднению расплавов Sr (и Ni) на ранних этапах кристаллизации. Составы лав и пирокластики Молодого Шивелуча отклоняются от тренда кристаллизации и формируют рассеянные линейные тренды, свидетельствующие о происхождении этих магм в результате смешения примитивной базальтовой магмы и в различной степени дифференцированных андезитов.

Вариации состава большинства пород Старого Шивелуча согласуются с модельными трендами фракционной кристаллизации и могут быть получены в результате 30-40% (андезибазальты) и 60-65% (андезиты) кристаллизации примитивного базальтового расплава (рис. 11). Среди пород Старого Шивелуча роль гибридных процессов можно предполагать только для андезибазальтовых лав, изверженных в конце начальной фазы деятельности.

5.2.5. Роль ассимиляции пород фундамента

Признаком ассимиляции пород континентальной коры в процессе дифференциации магм является корреляция между содержанием SiO₂, отношениями

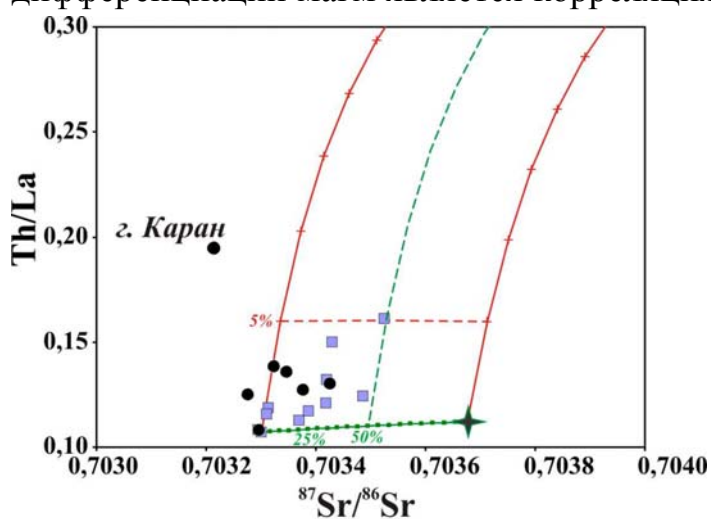


Рис. 12. Систематика $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – Th/La для пород вулканического массива Шивелуч. Условные обозначения см. на рис. 9.

изотопов стронция и отношениями сильно несовместимых элементов, которые не фракционируют при кристаллизационной дифференциации основных и средних магм. Как показано на рис. 8 и 9, в породах Шивелуча ряд отношений несовместимых элементов значимо коррелируют с содержанием SiO₂, что указывает на вероятность ассимиляции пород фундамента. В качестве вероятного ассимилянта могут рассматриваться метаморфические породы Хавывенской возвышенности, расположенной на западе п-ва Озерной.

Как показано в ряде работ по геолого-структурным и геофизическим данным, Хавывенское погребенное поднятие, состав пород которого ассоциируется с породами одноименной возвышенности, входит в состав фундамента Центрально-Камчатской депрессии и фиксируется под западным сектором Шивелуча (например, Иванов и др., 2001; Авдейко и др., 2001). В работах (Тарарин и др., 2007, 2010) были описаны кристаллические сланцы верхней и нижней толщ Хавывенской серии, которые могли быть ассимилированы магмами Шивелуча. Анализ возможного влияния ассимиляции на изотопный состав Sr и Nd и отношения Th/La в породах

приведен на рис. 9а и рис. 12. Породы верхней толщи, гидротермально-измененные базальты типа MORB (Тарарин и др., 2007) имеют высокие отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и не могут быть возможным ассимилянтом (рис. 9а). Тренд ассимиляции пород нижней части Хавывенской серии может объяснять вариации изотопного состава Sr и Nd в породах Шивелуча, однако в этих изотопных координатах тренд ассимиляции трудно отличить от тренда смешения с высоко-К мантийными базальтами. Возможность оценить влияние на состав магм мантийных высоко-К расплавов и ассимиляции пород нижней толщи Хавывенской серии возникает при анализе систематики отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и Th/La (рис. 12). Точки составов пород вулканического массива располагаются между трендами смешения с высоко-К базальтами и ассимиляции, что подразумевает вероятное влияние обоих процессов на состав магм. Согласно этой модели количество ассимилированного материала составляет от 0 до 5%.

Голоценовые экструзивные лавы г. Каран выделяются аномальными содержаниями литофильных элементов (Pb, Sr, Ba, Th и U), что может указывать на вклад коровой компоненты экзотического состава в их образование. Внедрение экструзии происходило за пределами основных хорошо проработанных каналов, что, вероятно, способствовало процессам ассимиляции пород фундамента. Северные склоны экструзии г. Каран находятся в непосредственном контакте с блоком неогеновых осадочных пород, который впервые был описан (Лопатин и др., 1979). Осадочные породы несут следы термального воздействия экструзивных лав, в экзоконтактовой зоне экструзии г. Каран присутствует большое количество дезинтегрированных ксенолитов осадочных пород. Детальное изучение этих пород позволило диагностировать их как алевритистый мергель со следующим составом $\text{SiO}_2=12.68$, $\text{TiO}_2=0.23$, $\text{Al}_2\text{O}_3=3.93$, $\text{MgO}=0.95$, $\text{CaO}=34.21$, $\text{Na}_2\text{O}=0.89$, $\text{K}_2\text{O}=0.57$, $\text{P}_2\text{O}_5=0.2$, $\text{CO}_2=26.87$ (мас. %), Ce=33, Rb=17, Ba=45877, Sr=399, Th=13 (г/т). Аномальное обогащение литофильными микроэлементами экструзивных и дайковых лав г. Каран может объясняться ассимиляцией около 2 % мергелистых пород.

5.3. Условия кристаллизации магм

Для оценки условий кристаллизации магм вулканического массива был использован эмпирический термобарометр и гигрометр (Ridolfi et al., 2010), позволяющий оценить давление, температуру, фугитивность кислорода и содержание H_2O при кристаллизации амфиболсодержащих известково-щелочных пород, в том числе и гибридного происхождения. Расчетные физико-химические параметры кристаллизации показаны в координатах T, P, $f\text{O}_2$ и H_2O (рис. 13). Рассчитанные составы близки к кривой стабильности амфибола и показывают соответствие с эмпирическими параметрами устойчивости различных минеральных фаз, сосуществующих с амфиболом (рис. 13а) и наблюдаемыми минеральными ассоциациями в породах вулканического массива. Это является хорошим критерием достоверности полученных данных. В соответствии с вариациями состава амфиболов Шивелуча, среди которых присутствуют магнезиальная роговая обманка, магнезиогастингсит и паргаситовая роговая обманка, P-T интервал кристаллизации также достаточно широкий. Оливинсодержащие породы вулканического массива (в которых развит паргаситовый амфибол) группируются

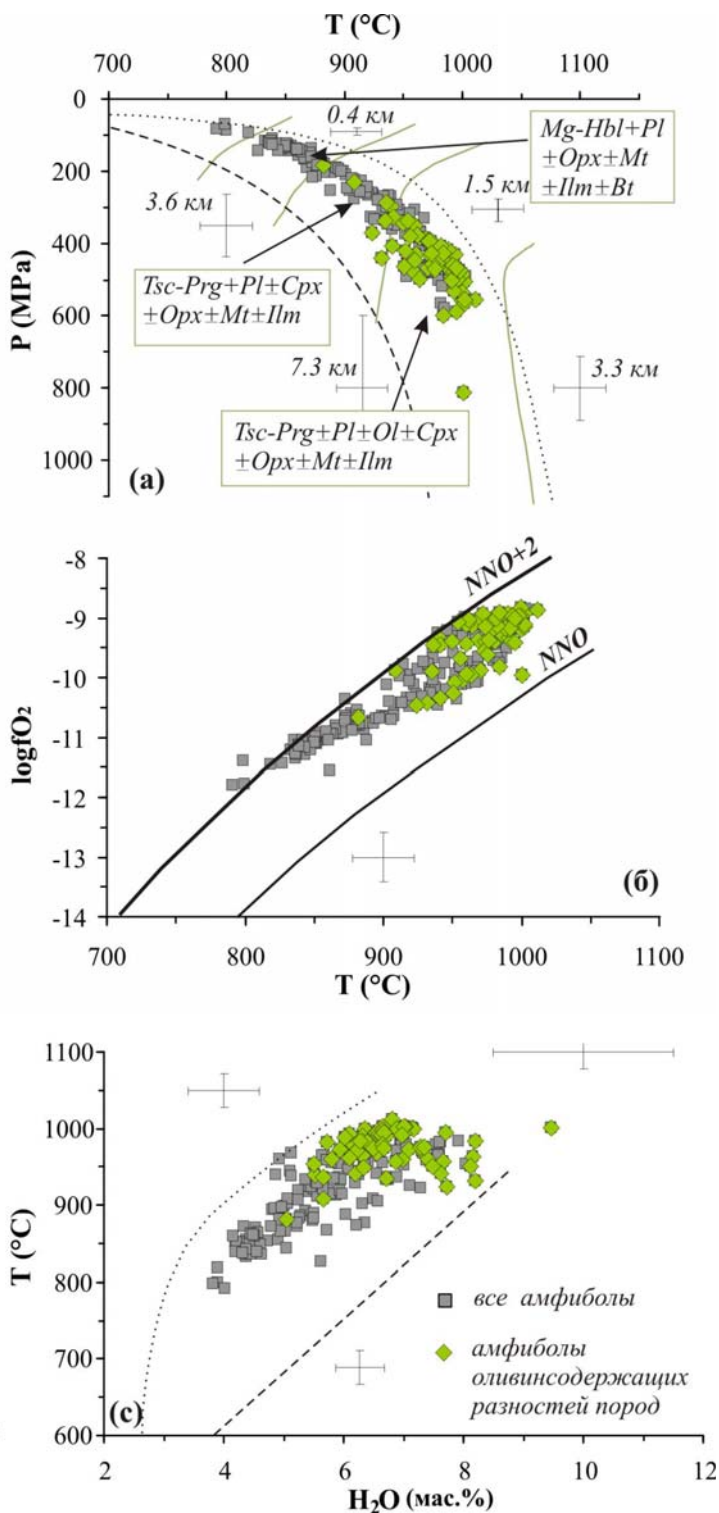


Рис. 13. P-T (а), $\log f_{O_2}$ -T (б) и T-H₂O расплав (с) диаграммы для амфиболов вулканического массива Шивелуч согласно систематике (Ridolfi et al., 2010). На диаграмме (а) зелеными изолиниями показаны P-T пределы устойчивости равновесия магнезиальной роговой обманки (Mg-Hbl) и паргаситового амфибола (Tsc-Prg) с различными минеральными фазами (Ol, Cpx, Opx, Pl, Bt, Mt, Ilm). На диаграммах (а) и (с) показаны максимальный (пунктирная линия) и минимальный (точечная линия) пределы стабильности амфибола.

в высокобарной и высокотемпературной области ($P=590-550$ МПа, $T=957-1011$ °C, $\Delta NNO=0.5-1.9$ и H_2O – до 7-8 мас. %). Составы амфиболов дифференцированных андезитов формируют протяженный тренд от высокобарной области до области низких давлений и температур ($T=872-818$ °C, $P=178-115$ МПа, $\Delta NNO=1.2-2.5$, $H_2O=3.9-5.2$ мас. %). Такой тренд находится в соответствии с петрографическими наблюдениями, согласно которым в ядрах магнезиальных роговых обманок наиболее дифференцированных экструзивных лав присутствуют высоко-Al амфиболы. Условия кристаллизации этих реликтовых фаз следующие: $T=925-987$ °C; $P=383-519$ МПа; $\Delta NNO=0.7-1.4$; $H_2O=6.0-7.6$ мас. %.

Полученные данные показывают хорошее соответствие с определениями при помощи других методов. К примеру, параметры кристаллизации магнезиальных роговых обманок согласуются с данными изучения расплавных включений в андезитах современного экструзивного купола: $T \sim 840$ °C; $P_{max}=160$ МПа; $\Delta NNO=1.5-2.1$; $H_{2O_{max}}=5.1$ мас. % согласно (Толстых и др., 2003; Humphreys et al., 2006).

С целью тестирования полученных расчетных данных по глубинным условиям кристаллизации голоценовых и современных лав – как показателя позиций областей накопления магмы под вулканом – было проведено статистическое сравнение барометрических данных и коровой сейсмичности по данным каталога вулканических землетрясений КФ ГС РАН за 2000-2009 гг. С учетом погрешностей при расчете давления кристаллизации, а

также с учетом того, что лавы Молодого Шивелуча поступают на поверхность на гипсометрических отметках, превышающих 1500-2000 м, а для гипоцентров вулканических землетрясений отсчет ведется от нулевой отметки земной поверхности, можно констатировать удовлетворительную сходимость полученных глубин кристаллизации и позиции двух асейсмичных зон. Таким образом, сопоставление независимых петрологических и геофизических параметров позволяет сделать вывод о возможном существовании двух областей накопления и кристаллизации магм под вулканом, которые отвечают близповерхностной магматической камере (3-5 км) и промежуточному коровому очагу (12-18 км).

5.4. Модель строения и эволюции питающей магматической системы вулканического массива

На основе полученных данных по эволюции состава пород и минералов с использованием расчетных данных по условиям кристаллизации и результатов численного моделирования была составлена схема строения питающей магматической системы для позднеплейстоценового (Старый Шивелуч) и голоценового (Молодой Шивелуч) этапов развития вулканического массива. При построении модели учитывались также результаты геохимического моделирования и различные механизмы дифференциации мантийных высокомагнезиальных магм с высоким содержанием воды, согласно (Вгоphy, 2008).

Начало формирования питающей магматической системы Старого Шивелуча (рис. 14а), предположительно, было связано с внедрением в нижние горизонты коры высоко-Mg водосодержащих мантийных магм и формированием промежуточного корового очага на границе нижней и верхней коры на глубине около 20 км. Фракционирование оливина и клинопироксена и ранняя кристаллизация амфибола в условиях промежуточного очага приводила к формированию кумулятивных амфиболовых габброидов и значительных объемов дифференцированных магм. Поступление в верхние горизонты коры продуктов неполной кристаллизации этих магм привело к образованию крупной близповерхностной камеры (или камер) и экструживно-эксплозивной активности начальной фазы деятельности вулканического массива. Заключительный этап начальной фазы деятельности Старого Шивелуча, связанный с небольшими по объему излияниями *O1-Cpx-Pl* базальтов, возможно, был обусловлен более интенсивным импульсом внедрения мантийных магм и пополнением промежуточного нижнекорового очага.

Последующее изменение характера эруптивной активности Старого Шивелуча – от эксплозивно-экструживного к обильным излияниям лав, также могло быть следствием усиления притока магм в нижнекоровый очаг. Завершающие этапы деятельности Старого Шивелуча были связаны с излияниями *Px-Pl±Ol* андезибазальтовых лав Байдарного отрога. Монотонность состава этих лав и их ассоциация с серией даек выдержанного северо-восточного простирания позволяет предполагать значимую роль региональных тектонических факторов на этом этапе активности. Предположительно, активизация ослабленной разломной зоны северо-восточного простирания способствовала массовому внедрению даек и быстрому поступлению на поверхность дифференцированных андезибазальтовых лав.

На голоценовом этапе развития вулканического массива (рис. 14б) размеры и глубинная позиция предполагаемых областей накопления магм могли измениться, что привело к уменьшению роли промежуточного нижнекорового очага и сделало

возможным смещение примитивных и дифференцированных магм в пределах близповерхностной магматической камеры.

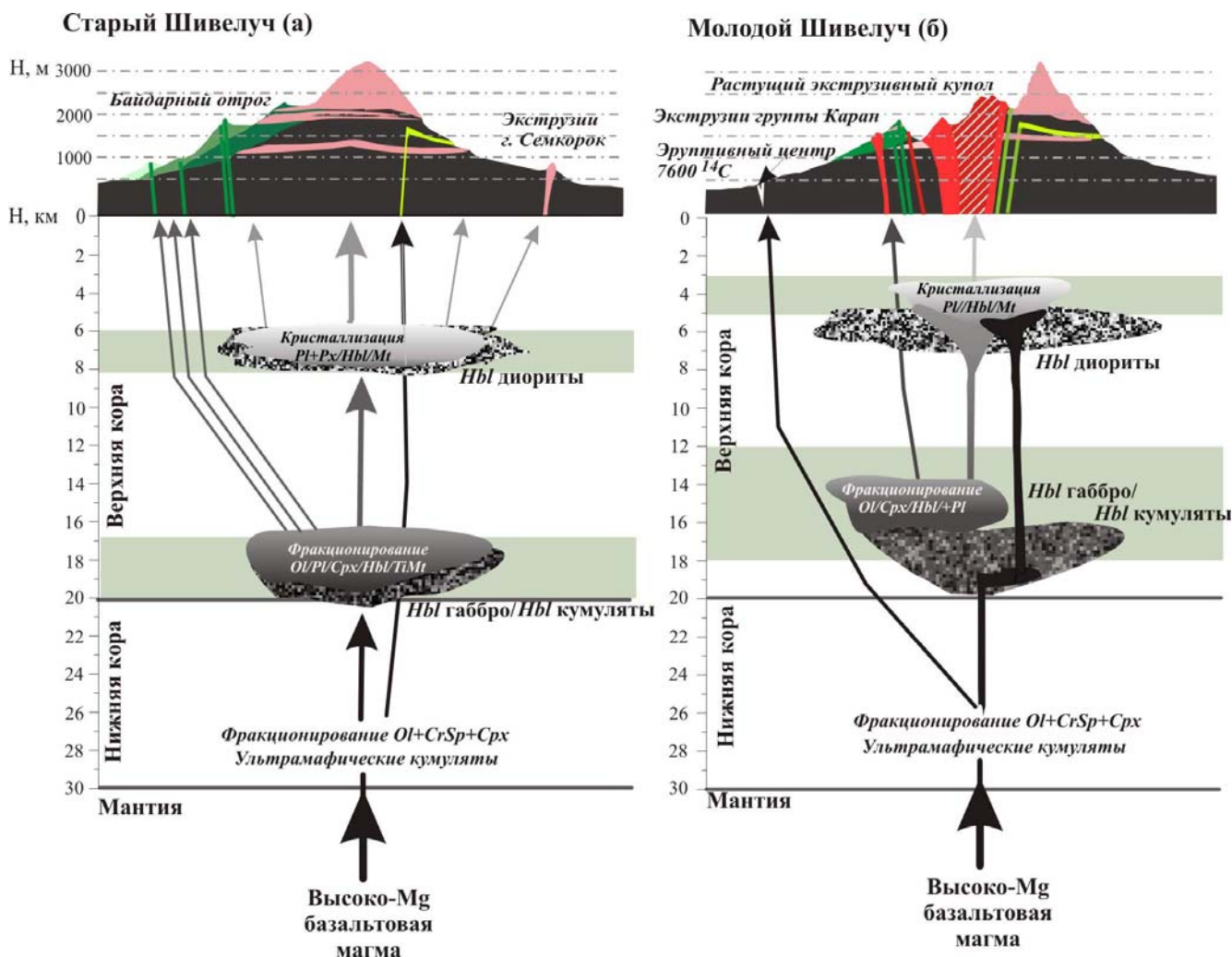


Рис. 14. Схема строения и эволюции питающей системы вулканического массива Шивелуч на позднеплейстоценовом (а) и голоценовом (б) этапах развития. Глубинная позиция предполагаемых магматических камер ограничена в соответствии со статистическими максимумами распределения барометрических оценок при кристаллизации амфиболов и данными геохимического моделирования (Gorbach et al., 2013). Кристаллизующиеся минеральные ассоциации приведены в соответствии с последовательностью выделения минеральных фаз, описанной в разделе 3.3. Выделение зон кумулятивных образований предполагается на основе схем коровой дифференциации водонасыщенных мантийных магм в присутствии амфибола (Brophy, 2008) и подтверждается обилием гомеогенных включений амфиболовых габброидов и габбро-диоритов в лавах вулкана.

Предложенная модель строения и эволюции питающей магматической системы не противоречит имеющимся на сегодняшний день геофизическим данным и результатам предшествующих работ. На позицию близповерхностной магматической камеры на глубине около 5 км впервые было указано в работе Меняйлова (1955) на основе общих геологических соображений. К сходным выводам пришли и авторы работы (Жаринов, Демянчук, 2008) на основе анализа данных по объему и расходу лав, формирующих современный экструзивный купол, а также данных (Humphreys et al., 2006) о максимальном давлении в 1.6 kbar, рассчитанного по содержанию H_2O (5.1 мас. %) в расплавных включениях из *Hbl-Pl* андезитов, изверженных в 2001 г. Существование и позиция более глубинного

промежуточного очага на глубинах от 8 до 25 км предполагались в работе (Горельчик и др., 1995) на основе анализа сейсмичности с 1964 по 1995 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы можно сформулировать в четырех защищаемых положениях:

1) Выделены и охарактеризованы основные типы пород, отвечающие различным временным этапам активности вулканического массива Шивелуч; реконструированы центры излияния позднеплейстоценовых лав; определены относительные объемные соотношения различных типов пород. Изучены вариации состава пород во времени и установлены различия в условиях дифференциации магм позднеплейстоценового (Старый Шивелуч) и голоценового (Молодой Шивелуч) этапов развития вулканического массива.

2) Эволюция магм вулканического массива Шивелуч определяется процессами кристаллизационной дифференциации и смешения магм в условиях близповерхностной магматической камеры и промежуточного очага на границе нижней и верхней коры. Вариации в составе пород обусловлены различными условиями кристаллизации: малоглубинной кристаллизацией для магм Байдарного отрога и многостадийной кристаллизацией с участием амфибола для магм начальной фазы деятельности вулканического массива и голоценового этапа развития. Ассимиляция коровых пород имела подчиненное значение.

3) На голоценовом этапе развития вулканического массива важную роль в процессах петрогенезиса играло смешение магм. Магнезиальные андезиты Молодого Шивелуча имеют гибридное происхождение и представляют собой смесь кислых дифференциатов и высокомагнезиальных магм, периодически поступающих в близповерхностную магматическую камеру. Близкие к адакитам геохимические особенности дифференцированных пород ($Sr/Y > 40$, $Y < 15$ г/т, $SiO_2 > 60$ мас.%) сформированы в результате процессов кристаллизационной дифференциации, сопровождаемых кумуляцией плагиоклаза и удалением амфибола из кристаллизующейся магмы.

4) Происхождение магм, исходных для серии пород вулканического массива, связано с плавлением деплетированного мантийного источника под воздействием водосодержащих расплавов из субдуцирующей Тихоокеанской плиты. Положительная корреляция отношений $^{87}Sr/^{86}Sr$ и степени обогащения примитивных пород несовместимыми элементами предполагает участие метасоматизированной литосферной мантии в процессах образования магм.

Список публикаций по теме диссертации:

Статьи:

1. Горбач Н.В. Первый лавовый поток на экструзивном куполе вулкана Шивелуч, 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. №2. С. 6-12.
2. Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч // Петрология. 2011. Т.19. №2 С. 140-172.
3. Горбач Н.В. Вулкан Старый Шивелуч: геологическое строение, реконструкция эруптивных центров и характер деятельности в позднем плейстоцене // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. Вып.17 № 1. С.77-90.
4. Gorbach N.V., Portnyagin M.V., Tembrel I. I. Volcanic structure and composition of Old Shiveluch volcano, Kamchatka // Journal of Volcanology and Geothermal research, 2013. V. 263. P. 193-208. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.12.012

Тезисы и материалы конференций:

5. Горбач Н.В. Формирование экструзивного купола вулкана Шивелуч и состав его лав в 2004-2005 гг. // Сборник, посвященный проблемам эксплозивного вулканизма, Петропавловск–Камчатский, 25-30 марта 2006 г. С. 112-119.
6. Горбач Н.В. Состав лав, формировавших экструзивный купол вулкана Шивелуч в 2004-2005 гг.// Вулканизм и геодинамика. Материалы 3 Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, Улан-Удэ, Изд. Бурятск. НЦ СО РАН, 2006. Т.3. С. 635-639.
7. Gorbach N. V. New lava of Shiveluch volcano: en evidense of magma mingling? // 5rd Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5), Japan. July 9-14, 2006. P. 133-137.
8. Gorbach N. V. Lava dome of volcano Shiveluch and composition of its eruptive products in 2004-2005. Procceding Volcano International Gathering and Merapi workshop. Yogyakarta – Central Java, Indonesia., 4-8 September 2006. P. 60-65.
9. Girina O. A., Gorbach N. V., Nuzhdaev A. A. and Demyanchuk Y. Geological Effect of 2005 Eruptions of Shiveluch Volcano, Kamchatka, Russia. // 5rd Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5), Japan. July 9-14, 2006. P. 43.
10. Горбач Н.В. Признаки взаимодействия различных по составу и температуре расплавов в современных экструзивных лавах вулкана Шивелуч (Камчатка).// Материалы VIII Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». 10-14 апреля 2007 г., Москва, РГГУ. Т.3. С. 84-88.
11. Горбач Н.В. Лавовые образования Молодого конуса вулкана Шивелуч.// Сборник материалов ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2007. С. 108-120.
12. Shipman J., Pallister J., Gorbach N., et al. Bezymianny and Shiveluch volcanoes, Kamchatka, Russia and Mount St. Helens, WA, USA: Response of volcanoes that have experienced edifice collapse. Abstract. AGU, San Francisco, USA. 10-14 December, 2007.
13. Gorbach N. V. Geological map of a Young Shiveluch lava complex. Abstract. Understanding volcanoes. General Assembly IAVCEI, Reykjavik, Iceland. 17-22 August, 2008. Abstract.

14. Горбач Н.В. Геолого-геохимическая характеристика начальной фазы деятельности вулкана Шивелуч. // Вулканизм и геодинамика. Материалы 4 Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, Петропавловск-Камчатский, 2009. С. 162-165.
15. Gorbach N., Portnyagin M., Ponomareva V. Shiveluch volcano: volcanic geology and geochemical diversity. // KALMAR-First Bilateral Workshop on Russian-German Cooperation on Kurile-Kamchatka and the Aleutian Marginal Sea-Island Arc Systems. Programm and Abstracts. April 27 – May 1, 2009, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, Terra Nostra. Schriften der GeoUnion Alfred –Wegener-Stiftung. Abstract Volume, 2009. № 1. p. 30-32.
16. Gorbach N., Portnyagin M., Ponomareva V. Volcanic and chemical geology of Shiveluch volcano: three major phases of evolution.// 6th Biennial Workshop on Japan- Kamchatka-Alaska Subduction Processes, Alaska, Fairbanks, USA, 22-26 June, 2009. Abstract.
17. Горбач Н.В., Портнягин М.В. Термобарометрия амфиболов лав Молодого Шивелуча: к проблеме строения питающей магматической системы вулкана // Материалы традиционной научной конференции, посвященной дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», 30 марта-1 апреля 2011 г., Петропавловск-Камчатский, С. 16.
18. Portnyagin M.V., Sobolev A.V., Mironov N.L., Gorbach N.V., Kuzmin D. and Hoernle K. The origin of primary magmas at the Kamchatka-Aleutian Arc junction by melting of mixed pyroxenite and peridotite mantle sources // 2nd Bilateral Workshop of KALMAR- Phase I: Kurile-Kamchatka and the Aleutian Marginal Sea-Island Arc Systems, Trier, Germany. May 16-20, 2011. P. 103-104.
19. Gorbach N. V., Portnyagin M.V. Evolution of the Late Pleistocene Old Shiveluch Volcano, Kamchatka// 2nd Bilateral Workshop of KALMAR- Phase I: Kurile-Kamchatka and the Aleutian Marginal Sea-Island Arc Systems, Trier, Germany. May 16-20, 2011. P. 58-59.
20. Gorbach N. V., Portnyagin M.V. Geochemistry and mineralogy of the Late Pleistocene Old Shiveluch volcano, Kamchatka // 7th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes, Petropavlovsk-Kamchatsky, 25-31 August, 2011. Abstract.