

На правах рукописи



Секисова Виктория Сергеевна

**ПЕТРОГЕНЕЗИС МАГНЕЗИАЛЬНЫХ БАЗАЛЬТОВ ВУЛКАНА ХАРЧИНСКИЙ
(КАМЧАТКА)**

Специальность 1.6.3 «Петрология, вулканология»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск.

Научный руководитель: **Смирнов Сергей Захарович**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории термобарогеохимии, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН) (г. Новосибирск).

Официальные оппоненты: **Перепелов Александр Борисович**, доктор геолого-минералогических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН) (г. Иркутск).

Щербаков Василий Дмитриевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экспериментальной и технической петрографии кафедры петрологии и вулканологии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ) (г. Москва).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН) (г. Петропавловск-Камчатский).

Защита состоится 15 апреля 2026 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т. Ак. Коптюга, д. 3, Котлярову А.В. Тел./факс: +7 (383) 373-05-18; +7(383) 373-05-61, e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте: https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/sekisoa/dis-Sekisova.pdf

Автореферат разослан «26» февраля 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 24.1.050.01, к.г.-м.н.



А.В. Котляров

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Субдукционный вулканизм неразрывно связан с мантийными магмами. Однако с момента образования и до извержения эти магмы могут претерпеть эволюцию в промежуточных камерах в пределах мантийного клина или даже в земной коре. Всё это неизбежно приводит к изменению состава и параметров магм в ходе множества процессов, таких как кристаллизационная дифференциация, контаминация вмещающими породами и смешение магм (Brophy, 1989). Несмотря на то, что такое многообразие процессов объясняет разнообразие надсубдукционных магм, оно скрывает информацию о составе первичных мантийных расплавов. В этой связи высокомагнезиальные базальты, которые рассматриваются многими в качестве представителей примитивных магм в субдукционных обстановках (Tatsumi, Eggins, 1995 и др.), несмотря на своё подчиненное количество в островных дугах (Eggins 1993; Rohrbach et al. 2005), вызывают большой петрологический интерес, поскольку позволяют реконструировать состав первичных магм и условия их генерации. Изучение высокомагнезиальных базальтов предоставляет возможность получить информацию о частичном плавлении, составе мантийного клина и содержании летучих компонентов в первичных островодужных магмах (Pichavant et al., 2002). Кроме всего прочего, выходя на поверхность, эти магмы иногда несут с собой ксенолиты глубинных пород, в которых также записана история процессов, связанных с образованием и эволюцией мантийных магм. Современные вулканы, в лавах и пирокластике которых одновременно присутствуют породы примитивного состава и разнообразные глубинные ксенолиты, – явление крайне редкое. К ним относится вулкан Харчинский, расположенный в Центральной Камчатской депрессии. Уникальное сочетание лав примитивного состава и глубинных ксенолитов этого вулкана позволяет реконструировать состав, условия генерации и последующей эволюции первичных магм в надсубдукционных обстановках. В свою очередь полученная информация будет востребована при создании обобщенных моделей происхождения примитивных островодужных магм. В этом и заключается **актуальность** данного исследования.

Объектами исследования выбраны ксенолиты глубинных пород и изверженные породы, слагающие лавовые потоки, некк и дайки вулкана Харчинский, а также расплавные и флюидные включения в минералах этих пород.

Целью исследования являлась реконструкция эволюции магмы, участвовавшей в образовании пород вулкана Харчинский, на основе их детальной минералогической и петрологической характеристики с использованием данных по включениям минералообразующих сред.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Получить валовые химические составы изверженных пород, определить характер распределения редких и рассеянных элементов в них;
2. Определить содержания главных и примесных элементов во вкрапленниках магнезиальных базальтов и выяснить последовательность минералообразования в этих породах;
3. Определить содержания главных и примесных элементов в минералах ксенолитов, выделить основные типы парагенезисов пород ксенолитов и временные соотношения слагающих их минералов;
4. Провести расчет RTf_{O_2} -параметров с помощью минеральных геотермобарометров для эффузивных пород и ксенолитов;
5. Провести изучение включений минералообразующих сред во вкрапленниках эффузивных пород, чтобы установить параметры минералообразования, составы расплавов и особенности их эволюции; полученные результаты сопоставить с PT -оценками, рассчитанными с помощью минеральных геотермобарометров;

6. Сопоставить минеральный состав ксенолитов с вкрапленниками эффузивных пород, чтобы установить природу пород ксенолитов.

Фактический материал. Основой работы послужил каменный материал, отобранный сотрудниками ИГМ СО РАН к.г.-м.н. Кузьминым Д.В., к.г.-м.н. Шевко А.Я. и к.г.-м.н. Гора М.П. и любезно предоставленных автору работы. Отбор образцов осуществлялся в ходе геологических маршрутов при проведении полевых работ 2013 года на территории Камчатского полуострова. Для исследования из представительной коллекции были выбраны 9 образцов ксенолитов глубинных пород и 23 образца изверженных пород, слагающих лавовые потоки, некк и дайки.

Для минералого-петрографических исследований отбирались мономинеральные фракции, а также было изготовлено 20 петрографических шлифов и более 70 препаратов (термобарогеохимических пластинок и шашек из эпоксидной смолы). Определение химических составов пород, минералов, стекол и дочерних фаз включений проводились в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований (МИИ ЦКП) ИГМ СО РАН и Новосибирском государственном университете (НГУ). Были выполнены 31 анализ пород на главные элементы методом РФА и 27 анализов на редкие и редкоземельные элементы методом ICP-MS. Было проведено 20 анализов минералов на содержание элементов-примесей методом LA-ICP-MS. Определено более 1000 составов породообразующих минералов и дочерних фаз включений рентгеноспектральными методами анализа. Автором лично проведено около 100 микротермометрических экспериментов по гомогенизации включений минералообразующих сред и снято более 100 КР-спектров минералов и дочерних фаз включений. Все составы и спектры были получены с соблюдением международных стандартов как при пробоподготовке, так и при выполнении анализов.

Личный вклад автора диссертации заключается в петрографическом изучении пород, подготовке каменного материала для различных анализов, отборе мономинеральных фракций, изготовлении эпоксидных шашек и препаратов для минералого-геохимических исследований, проведении микротермометрических экспериментов и термобарогеохимических исследований, выполнении расчетов RTf_{O_2} -параметров с помощью минеральных геотермобарометров и гигрометров, подборе необходимой литературы, а также обработке, анализе и интерпретации полученных данных.

Защищаемые положения.

1. Ликвидусная ассоциация магнезиальных базальтов и андезибазальтов вулкана Харчинский представлена оливином и хромистой шпинелью, которые кристаллизовались в окисленных условиях $NNO+0.4 - NNO+1.5$ при температуре $1115 - 1185^{\circ}C$ из высокомагнезиального ($Mg\# \approx 76$), низкоглиноземистого и низкокальциевого базитового расплава, содержащего $1.5 - 2.8$ мас.% воды.

2. Высокомагнезиальные базальтовые магмы вулкана Харчинский кристаллизовались, по крайней мере, на двух глубинных уровнях, соответствующих давлениям $0.1 - 1.5$ и $11 - 13$ кбар, в то время как камера трахиандезибазальтов некка находилась на глубине, отвечающей давлению $5 - 7$ кбар.

3. Большинство ксенолитов из трахиандезибазальтов вулкана Харчинский представлено кумулятивными перидотитами и клинопироксенитами, образовавшимися при давлениях $2 - 7$ и $6 - 10$ кбар соответственно в окисленных условиях $NNO+2.4 - NNO+3.7$ и температурном диапазоне от $1075 - 1150^{\circ}C$ до $780 - 820^{\circ}C$ из расплавов сходных по геохимическим характеристикам с высокомагнезиальными базальтами этого вулкана.

Научная новизна. По данным изучения включений минералообразующих сред во вкрапленниках магнезиальных базальтов оценен состав первичных расплавов, а также реконструирован температурный режим эволюции магм под вулканом Харчинский. Впервые оценены температуры образования минералов вторичного парагенезиса из пород ксенолитов вулкана Харчинский.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные данные, безусловно, дополняют информацию о магматизме северной части Центральной Камчатской депрессии. Сделанные выводы будут востребованы при изучении базитового вулканизма Камчатки и Курильских островов, а также внесут вклад в понимание процессов генерации и дальнейшей эволюции мантийных магм в островодужных обстановках.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Основной материал изложен на 168 страницах и включает 43 рисунка и 20 таблиц. Все графические материалы размещены в тексте для удобства читателей. Список литературы содержит 188 наименований. Первая глава посвящена детальному описанию методов исследования. Во второй главе приведен литературный обзор проблем, связанных с изучением проявлений примитивного базальтового вулканизма в пределах Курило-Камчатской дуги. В третьей главе приводится геологическая характеристика изучаемого объекта. Четвертая глава посвящена результатам изучения пород, слагающих нект и лавовые потоки на склонах вулканической постройки, а также данные, полученные по расплавленным включениям во вкрапленниках оливина. В пятой главе приведены результаты изучения пород ксенолитов вулкана Харчинский. В конце четвертой и пятой глав развернуто обсуждаются полученные данные, и приводится их интерпретация. В шестой главе на основе сравнения с данными по магнезиальным базальтам и андезибазальтам всей Курило-Камчатской дуги формулируется концепция модели образования пород вулкана Харчинский. В заключении тезисно перечисляются наиболее значимые выводы. После основного материала размещены списки условных обозначений, использованной литературы и публикаций с участием автора работы.

Апробация работы и публикации. По материалам, использованным для написания диссертации, опубликовано 14 работ, из которых 4 статьи, включенных в список ВАК, из них 2 статьи в журнале «Геология и геофизика» посвящены непосредственно породам вулкана Харчинский. Промежуточные результаты работы представлялись на 10 всероссийских и международных конференциях в период с 2016 по 2023 гг.: Moscow International School of Earth Sciences (I.S.E.S.-2016, Москва), 8th International Siberian early career geoscientists conference (Новосибирск, 2016), 17^{ая} Всероссийская конференция по термобарогеохимии, (Улан-Удэ, 2016), 11^{ая} L.L. Perchuk International School of Earth Sciences (I.S.E.S.-2017, Миасс), 27^{ая} Всероссийская молодежная конференция с участием исследователей из других стран «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2017), 10th Biennial workshop on subduction processes Japan-Kamchatka-Alaska, (JKASP-2018, Петропавловск-Камчатский), 10^{ая} Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия» (Черноголовка, 2019), 19^{ая} Всероссийская конференция по термобарогеохимии (Новосибирск, 2022), 8^{ая} Всероссийская конференция с международным участием «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал» (Новосибирск, 2023), 6^{ая} Всероссийская конференция с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит», (Владивосток, 2023).

Благодарности. Автор искренне благодарит научного руководителя д.г.-м.н., профессора НГУ Сергея Захаровича Смирнова за помощь и всестороннюю поддержку на всех этапах проведения исследования и подготовки диссертации; к.г.-м.н. Дмитрия Владимировича Кузьмина за консультации и детальные обсуждения результатов исследования. Автор благодарит к.г.-м.н. Шевко А.Я. и к.г.-м.н. Гора М.П. за любезно предоставленный каменный материал. Автор признателен сотрудникам ИГМ СО РАН: к.г.-м.н. Карманову Н.С., к.г.-м.н. Королюку В.Н., Хлестову М.В., к.т.н. Кармановой Н.Г., к.х.н. Палесскому С.В., к.х.н. Николаевой И.В., к.г.-м.н. Рагозину А.Л., Куприянову И.Н. за помощь при проведении аналитических работ. Искренняя благодарность Шохоновой Л.А. за помощь в пробоподготовке и к.г.-м.н. Крашенинникову С.П. за проведение микротермометрических экспериментов в ГЕОХИ РАН. Автор благодарит за обсуждение промежуточных результатов

исследования, ценные советы и рекомендации по улучшению работы к.г.-м.н. Старикову А.Е., к.г.-м.н. Тимину Т.Ю., к.г.-м.н. Низаметдинова И.Р., к.г.-м.н. Соколову Е.Н. Автор выражает искреннюю благодарность д.г.-м.н. Изоху А.Э., д.г.-м.н. Дорошкевич А.Г., д.г.-м.н. Круку Н.Н., д.г.-м.н. Туркиной О.М. за внимательный анализ рукописи, а также ценные замечания и рекомендации, позволившие дополнить и улучшить текст диссертации.

Отдельная благодарность моей маме Секисовой О.П. за подъем мотивации и необходимые слова поддержки в сложные периоды.

Диссертация подготовлена в лаборатории 436 термобарогеохимии ИГМ СО РАН, возглавляемой д.г.-м.н. Томиленко А.А. Автор искренне признателен всему коллективу лаборатории за поддержку и дружелюбную атмосферу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-35-00491), Российского научного фонда (проект 23-27-00216), комплексной программы научных исследований СО РАН (проект 44.2) и в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400312-2).

ГЛАВА 1. ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой работы послужил каменный материал, отобранный в 2013 году и любезно предоставленный автору сотрудниками ИГМ СО РАН к.г.-м.н. Кузьминым Д.В., к.г.-м.н. Шевко А.Я., к.г.-м.н. Гора М.П. Из представительной коллекции для исследования были выбраны 9 различных ксенолитов и 23 образца эффузивных пород. В процессе работы применялся широкий спектр современных минералого-геохимических методов исследования, включающий оптическую микроскопию, рентгеноспектральные методы, КР-спектроскопию, микротермометрию и различные валовые методы анализа пород.

В процессе пробоподготовки использовался бинокулярный микроскоп МБС 10. Изучение модального состава пород, выявление взаимоотношений минералов, а также поиск зерен и включений для дальнейших исследований осуществлялись с помощью оптического фотомикроскопа с проходящим и отраженным светом OLYMPUS BX51 (Япония).

Содержания петрогенных и второстепенных элементов в породе определялись методом рентгенофлуоресцентного анализа на рентгеновском спектрометре ARL-9900-XP фирмы Thermo Electron Corporation (31 анализ, аналитик Карманова Н.Г.). Валовые содержания редких и редкоземельных элементов определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре Finnigan Element по стандартной методике (27 анализов, аналитик Палесский С.В.).

Для количественного анализа химического состава пороодообразующих минералов, стекол и дочерних фаз расплавных включений использовались рентгеноспектральные методы (определено более 1000 составов минералов). Определение составов проводилось методом ВДС на электронно-зондовых микроанализаторах JEOL JXA-8100 и JEOL JXA-8230 (оператор Королук В.Н.) и методом ЭДС на электронном сканирующем микроскопе TESCAN MIRA 3LMU (оператор Хлестов М.В.) с полевой эмиссией, оборудованном системой микроанализа INCA Energy 450 с полупроводниковым детектором XMax-80 фирмы Oxford Instruments Nanoanalysis. При анализе оливина была использована специальная методика, описанная в работе (Sobolev et al., 2007).

При работе с невоскритыми включениями минералообразующих сред применялся метод Рамановской спектроскопии (КР-спектроскопии или спектроскопии комбинационного рассеяния), позволяющий определить состав газовой фазы включений, наличие воды в остаточных стеклах и идентифицировать некоторые кристаллические фазы в расплавных включениях. При работе применялся спектрометр Jobin-Yvon LabRam HR800 фирмы Horiba Scientific с встроенными CCD детектором, охлаждаемым элементом Пельтье, и конфокальным микроскопом OLYMPUS BX41.

Микротермометрические методы исследования применялись для изучения нескрытых расплавных включений в оливине (около 100 прогревов). Эксперименты при отрицательных температурах проводились для изучения содержимого флюидных включений и газовых пузырей в расплавных включениях. Применялась микротермокамера Linkam THMSG600. Прогрев расплавных включений в оливине до температур 1000°C и выше проводился на микротермокамере конструкции Томиленко-Осоргина (Осоргин, Томиленко, 1990) в инертной среде. Инертная среда обеспечивалась чистым аргоном. Упомянутые выше исследования проводились в ЦКП МИИ ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и непосредственно в лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН.

Содержания редких и редкоземельных элементов в клинопироксене и амфиболе из ксенолитов определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS) на масс-спектрометре Thermo Scientific X-series 2 с приставкой лазерной абляции New Wave UP-213 на геолого-геофизическом факультете НГУ.

Массовый прогрев включений в оливине без визуального контроля при заданной фугитивности кислорода осуществлялся в высокотемпературной трубчатой печи Nabertherm RHTV 1700 в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН, г. Москва, прогрето более 100 зерен оливина). После прогрева зерна оливина монтировались в шашки из эпоксидной смолы, которые стачивались и полировались с целью выведения включений на поверхность. После вскрытия в таких экспериментально закаленных включениях анализировался состав их стекол методом ВДС. Впоследствии эти составы пересчитывались, чтобы восстановить исходные содержания SiO_2 и воды в расплавных включениях, согласно (Portnyagin et al., 2019; Gavrilenko et al., 2016), а также учесть постзахватное переуравновешивание FeO и MgO с помощью программы Petrolog3 (Danyushevsky, Plechov, 2011; Danyushevsky et al., 2000). Кроме того, расчетные методы использовались для оценки параметров минералообразования с применением минеральных геотермометров, геобарометров и гигрометров.

ГЛАВА 2. ИЗУЧЕННОСТЬ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ БАЗАЛЬТОВ КАМЧАТКИ И ВУЛКАНА ХАРЧИНСКИЙ

подавляющая часть наземных активных вулканов приурочена к островодужным геотектоническим обстановкам, которые отличаются широким разнообразием вулканических серий магматических пород. И хотя магнезиальные базальты среди них присутствуют в резко подчиненном количестве, тем не менее, они имеют важное петрологическое значение и встречаются во многих островных дугах: Малая Антильская (Macdonald et al., 2000); Алеутская (Gust, Perfit, 1987); Курило-Камчатская (Волынец и др., 1994) и некоторые другие.

Высокомагнезиальными считаются породы с $\text{Mg\#} > 0.6$, где $\text{Mg\#} = \text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO})$, согласно (Kelemen et al., 2003). При моделировании, согласно (Tatsumi, Eggins, 1995), в качестве примитивных предлагается выбирать породы, отвечающие следующим критериям: $\text{Mg\#} > 70$, $\text{FeO}^*/\text{MgO} < 1$, $\text{Ni} > 200 \text{ ppm}$ и $\text{Cr} > 400 \text{ ppm}$. Считается, что породы с магнезиальностью более 73 могут представлять недифференцированные расплавы, равновесные с оливином $\text{Fo}_{>90}$ (Jaques, Green, 1980). В работе (Flerov, Bogoyavlenskaya, 1983), в качестве критерия предлагается рассматривать отношение $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (оксиды в мас.%). Если $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 0.6$, то породу следует называть высокомагнезиальным базальтом. Породы с $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 0.4$ относятся к высокоглиноземистым базальтам. И, наконец, породы с $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.4 - 0.6$ следует считать переходным между ними типом. Этот классификационный подход с учетом выделения высокоглиноземистых ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 16.5 \text{ мас.}\%$) пород по (Куно, 1980) был принят в диссертационной работе.

В пределах Курило-Камчатской дуги магнезиальные базальты встречаются, прежде всего, в участках Центральной Камчатской депрессии: на вулканах Ключевской (Озеров и др., 1996; Portnyagin et al., 2007), Шивелуч (Волынец и др., 1994), Заречный (Волынец и др., 1999; Горбач и др., 2023; Siegrist et al., 2021), Толбачик (Portnyagin et al., 2015), реже они

присутствуют среди продуктов извержений вулканов Восточного Вулканического пояса: Авачинский (Kepezhinskas et al., 1997; Volynets, 1994), Горелый (Duggen et al., 2007), Корякский (Nekrylov et al., 2022), а также на вулканах Курильской гряды: Алаид, Меньший брат, Кетой, Тятя, Райкоке, Брат Чирпоев, Атсонопури и некоторых других (Горшков, 1967; Федорченко и др., 1989; Чибисова и др., 2009; Кузьмин и др., 2023; Marynov et al., 2024). Как правило, магнезиальные базальты образуют отдельные лавовые потоки в постройках стратовулканов или изолированные шлаковые и лавовые конусы в зонах ареального моногенного вулканизма, например, в Шишейском комплексе, Толбачинском Доле (Portnyagin et al., 2007), Тигильском Доле (Volynets et al., 2023). И только конус вулкана Харчинский практически полностью сложен лавами высокомагнезиальных базальтов и андезибазальтов.

Предполагается, что источником базальтовых магм являются перидотиты мантийного клина (Kushiro, 1975; Gill, 1981; Tatsumi, 1989). При этом важную роль в процессах магмогенерации в надсубдукционных обстановках играет вода, отделяющаяся от субдуцирующих океанической коры и осадков (Cervantes, Wallace, 2003; Grove et al., 2012; Portnyagin et al., 2019).

Изучение включений минералообразующих сред во вкрапленниках высокомагнезиальных базальтов позволяет напрямую оценить содержания воды в расплаве. Было показано, что примитивные островодужные расплавы в среднем содержат не менее 4 мас.% H_2O (Plank et al., 2013). В субдукционных базальтовых магмах концентрация воды может достигать 6 – 8 мас.% (Grove et al., 2002).

Примитивные породы в пределах Центральной Камчатской депрессии могут содержать информацию о составе первичных островодужных расплавов. Этим объясняется интерес, проявляемый к вулкану Харчинский, упоминания о котором встречаются еще в XVIII веке (Крашенинников, 1755). Характеристики морфологии вулкана, а также первые данные по петрографии и минералогии слагающих его пород были установлены во 2-ой половине XX века в работах различных ученых (Меняйлов, 1949; Огородов, Белоусов, 1961; Кутыев, Эрлих, 1973). Более детальное петрографическое, минералогическое и геохимическое изучение эффузивных пород вулканов Харчинский и Заречный проведено сравнительно недавно (Волынец и др., 1998; 1999; Горбач и др., 2023). Помимо этого, появилось сразу несколько работ, посвященных минералого-геохимическому изучению ксенолитов (Siegrist et al., 2019; 2021).

Анализ литературных данных показывает, что, несмотря на большой интерес, информация о параметрах минералообразования изверженных пород вулкана Харчинский в доступной литературе отсутствует. Нет опубликованных данных изучения флюидных и расплавных включений в минералах магнезиальных базальтов этого вулкана. Отсутствует информация о составах исходных расплавов. Слабо изучены история и механизмы образования пород ксенолитов; роль и место наложенных на них преобразований. Недостаточно ясна связь между магнезиальными базальтами, породами ксенолитов и некка.

ГЛАВА 3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВУЛКАНА ХАРЧИНСКИЙ

Вулкан Харчинский находится в северной части полуострова Камчатка и расположен между вулканами Шивелуч и Ключевской. Эти вулканы располагаются в наиболее широкой части грабен-синклинали Центральной Камчатской депрессии, приуроченной к зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Положение вулкана Харчинский контролируется дугообразной в плане зоной разрывных нарушений, выпуклая сторона которой обращена на запад (Меняйлов, 1949; Кутыев, Эрлих, 1973; Волынец и др., 1998).

Вулкан Харчинский – существенно лавовый неактивный позднеплейстоценовый стратовулкан высотой 1400 м. Овальное в плане основание вулкана имеет размер 15х12 км. Прямые сведения о возрасте и составе фундамента, на котором непосредственно располагается вулканический аппарат, отсутствуют. Конус вулкана рассечен двумя оврагами

на северную и южную части. (Меняйлов, 1949; Кутыев, Эрлих, 1973; Огородов, Белоусов, 1961; Волынец и др., 1998).

Современный облик вулканической постройки сформировался в три этапа. На раннем этапе происходили извержения центрального типа. За ними последовало внедрение радиальных даек. Завершилось формирование постройки образованием кальдеры обрушения (Меняйлов, 1949; Кутыев, Эрлих, 1973). Впоследствии морфологические элементы вулканического и тектонического происхождения были изменены ледниковой эрозией (Волынец и др., 1998).

Депрессия, пересекающая вулканическую постройку в субширотном направлении и разделяющая вулкан на северную и южную части, разделена посередине гребнем, природа которого окончательно не установлена. Многие исследователи склоняются к мнению, что этот гребень представляет собой эродированный некк (Меняйлов, 1949; Кутыев, Эрлих, 1973; Огородов, Белоусов, 1961). Интерес к изучению пород некка обусловлен наличием в нем многочисленных ксенолитов глубинных пород, среди которых в разное время отмечались перидотиты (гарцбургиты, лерцолиты, роговообманковые верлиты, дуниты), вебстериты и пироксениты (Волынец и др., 1998; Колосков, 1999; 2011; Колосков и др., 2017; Siegrist et al., 2019).

Главными продуктами извержений вулкана Харчинский являются лавы (Кутыев, Эрлих, 1973; Волынец и др., 1998). Большинство лавовых потоков сложены высокомагнезиальными ($Mg\# > 60$) базальтами, также встречаются умеренно магнезиальные базальты и андезибазальты, а некк представлен магнезиальными трахиандезибазальтами.

ГЛАВА 4. ЭФФУЗИВНЫЕ ПОРОДЫ ВУЛКАНА ХАРЧИНСКИЙ

Лавы вулкана Харчинский представлены базальтами и андезибазальтами нормальной щелочности (Рис. 1). Породы, как правило, относятся к известково-щелочной (Miyashiro, 1974), низкоглиноземистой (Kuno, 1960), низкокальциевой (Macdonald et al., 2000) и умереннокалиевой (Gill, 1981) сериям. Магнезиальность изученных пород варьирует от 54 до 73 при содержании MgO от 6.0 до 13.7 мас.%. Значения MgO/Al_2O_3 изменяется от 0.4 до 1.1. В целом, составы магнезиальных базальтов и андезибазальтов вулкана Харчинский похожи на аналогичные породы с других вулканов Камчатки и Курильских островов (Горшков, 1967; Федорченко и др., 1989; Волынец и др., 1994; Волынец и др., 1999; Кузьмин и др., 2023; Горбач и др., 2023; Volynets, 1994; Volynets et al., 2000; Khubunaya et al., 2007; Portnyagin et al., 2015).

Вкрапленники базальтов и андезибазальтов представлены оливином, клинопироксеном, реже плагиоклазом и единичными зернами хромита. Структура пород сериальнопорфировая, гломеропорфировая, реже спорадофировая и афировая. Вкрапленники погружены в основную массу, которая содержит варьирующие по размеру микролиты плагиоклаза, ксеноморфные зерна клинопироксена, скелетные кристаллы титаномагнетита, реже присутствуют апатит, ортопироксен, оливин и стекло в подчиненном количестве. Структура основной массы микролитовая, пилотакситовая, интерсертальная, в некоторых участках дендритовая.

Некк вулкана сложен трахиандезибазальтом, согласно (Петрографический кодекс..., 2009). Вкрапленники в трахиандезибазальте представлены флогопитом, амфиболом и клинопироксеном. Порода некка так же, как и базальты относится к известково-щелочной, низкоглиноземистой, низкокальциевой и высокомагнезиальной ($Mg\# = 70$) сериям (Рис. 1). Значения MgO/Al_2O_3 составляет 0.7. По сравнению с лавами порода некка обогащена K_2O и обеднена Cr_2O_3 (Рис. 1).

Лавы вулкана Харчинский обогащены крупноионными литофильными (Rb, Ba, Cs) элементами и Sr и обеднены высокочargedными (Nb, Ta, Zr и Ti) элементами (Рис. 2). Изученные породы обладают максимальными для камчатских пород отношениями $(Ba/La)_N = 4.6 - 5.6$, $(Th/La)_N = 0.7 - 1.1$, $(Ba/Th)_N = 4.9 - 7.2$ и $(Sr/Nd)_N = 2.0 - 2.8$. Базальты

также обогащены легкими редкоземельными элементами $(La/Yb)_N = 2.1 - 4.5$. Для породы некка также характерны повышенные по отношению к другим вулканам ЦКД значения $(Ba/La)_N = 4.7$, $(Th/La)_N = 1.5$, $(Ba/Th)_N = 3.2$ и $(Sr/Nd)_N = 1.9$ и более высокие содержания некоторых высокочarged элементов, например, Th и Zr (Рис. 2).

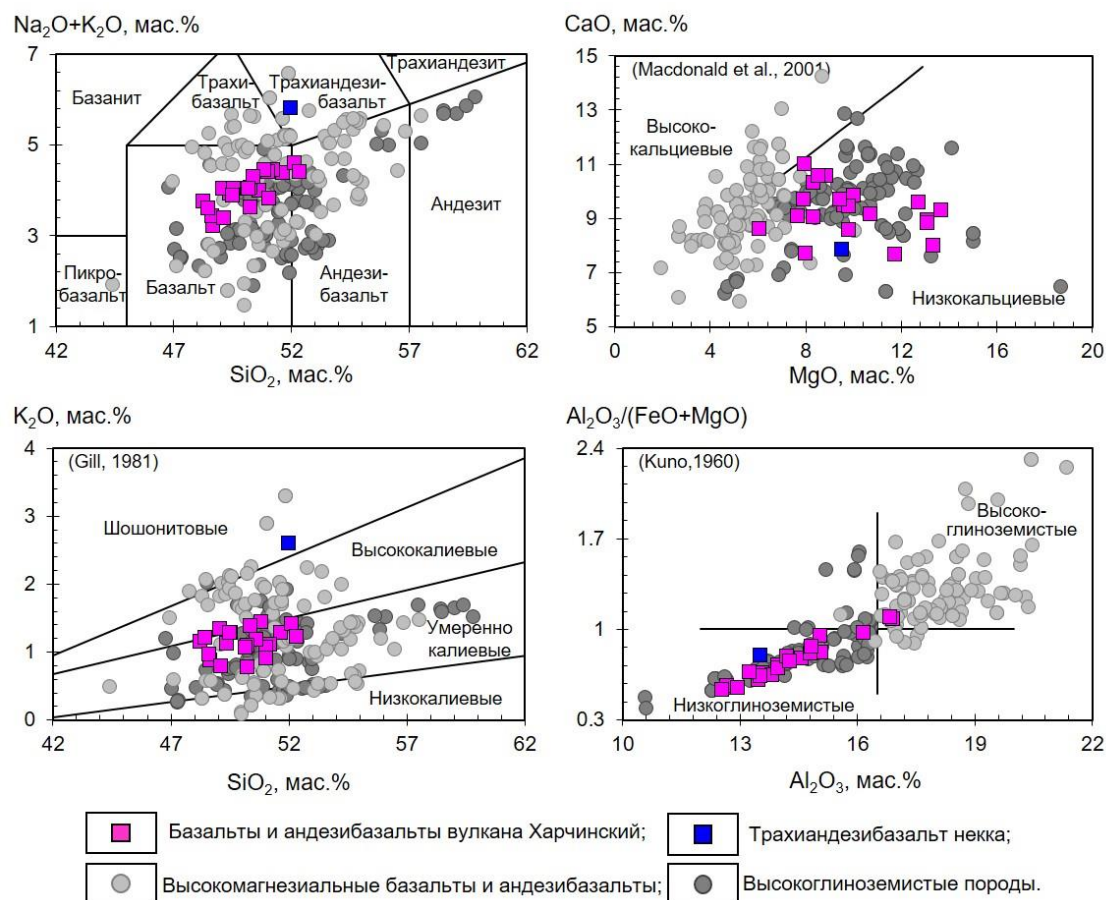


Рис. 1. Содержания главных элементов в базальтах и андезибазальтах вулкана Харчинский. Серые кружочки – высокомагнезиальные и высокоглиноземистые породы вулканов Курило-Камчатской, Алеутской и Малой Антильской дуг, приведенные по данным (Горшков, 1967; Федорченко и др., 1989; Волюнец и др., 1994; Волюнец и др., 1999; Кузьмин и др., 2023; Горбач и др., 2023; Volynets, 1994; Volynets et al., 2000; Khubunaya et al., 2007; Portnyagin et al., 2015; Gust, Perfit, 1987; Heath et al., 1998).

Особое внимание в работе уделено вкрапленникам оливина, как наиболее раннему минералу. На основе минералого-петрографических исследований выделено три морфологических типа оливина. К первому типу относятся крупные идиоморфные одиночные слабо трещиноватые кристаллы оливина Fo_{89-80} иногда с включениями хромита. Они, как правило, незональные. Второй тип представлен хорошо ограниченными до округлых кристаллами оливина и их гломеропорфировыми сростками. Отличительной особенностью этого типа является наличие отчетливой прямой зональности, при которой состав вкрапленников постепенно изменяется от Fo_{91-86} в центре до Fo_{80-76} и Fo_{62} на краю в базальтах и андезибазальтах соответственно. К третьему типу относятся зерна оливина Fo_{85-63} неправильной формы, сильно трещиноватые и окруженные каймой ортопироксена.

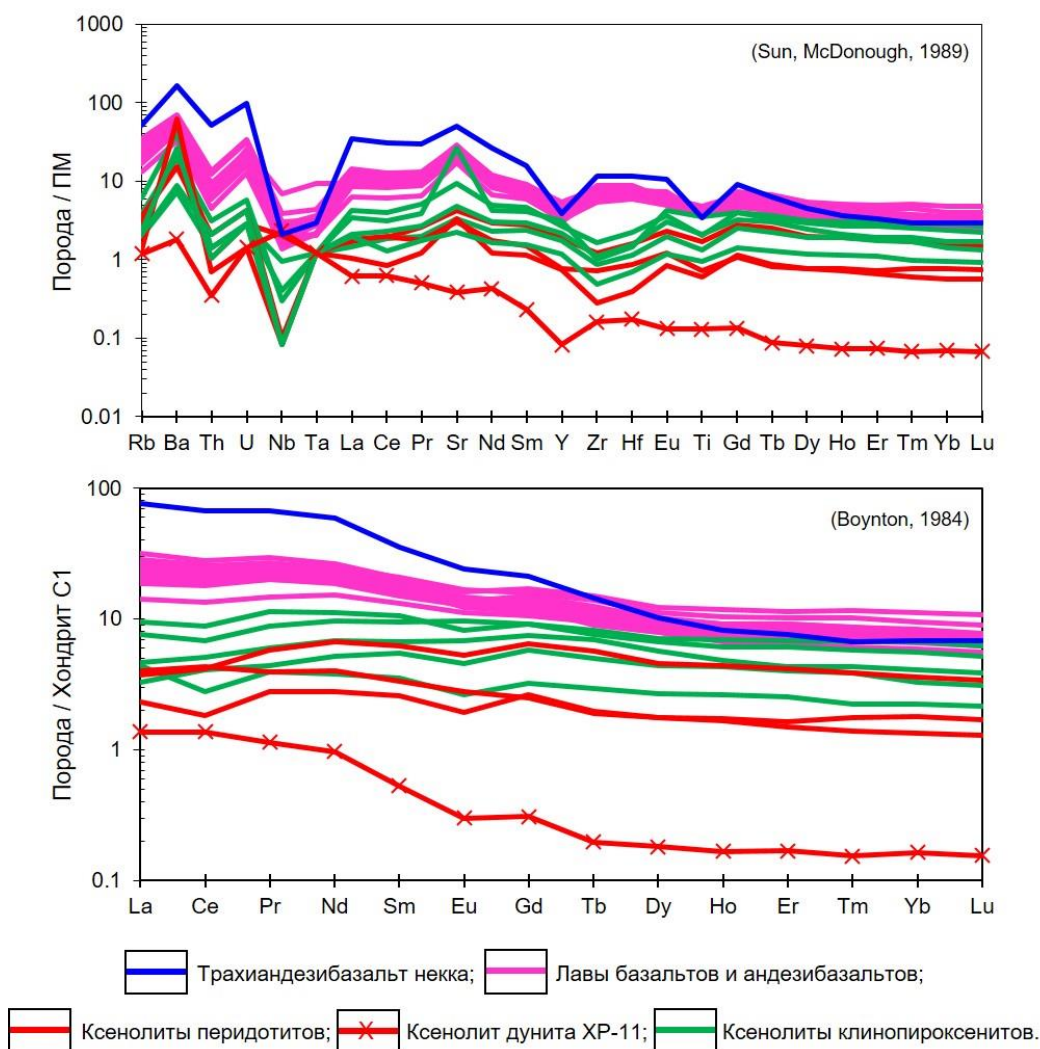


Рис. 2. Характер распределения несовместимых и редкоземельных элементов в базальтах и андезибазальтах, а также в породах ксенолитов вулкана Харчинский. Нормирование проведено на состав примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989) и хондрита C1 (Boynton, 1984).

Составы оливина формируют единый тренд вне зависимости от выделенных морфологических типов (Рис. 3). Они содержат умеренные концентрации примесных компонентов. При этом содержания Ni, Cr и Al понижаются, в то время как концентрации Ca, Ti и Mn увеличиваются с ростом железистости.

Вкрапленники клинопироксена по составу отвечают диопсиду и авгиту $\text{En}_{36-50}\text{Fs}_{6-18}\text{Wo}_{38-50}$, $\text{Mg\#} = 70 - 90$. Состав плагиоклаза $\text{An}_{42-92}\text{Ab}_{7-53}\text{Or}_{0-6}$ изменяется от андезина до анортита.

Состав оливина позволяет оценить магниальность равновесного с ним расплава. Учитывая то, что коэффициент распределения Fe-Mg между оливином и расплавом слабо зависит от температуры и состава и является почти постоянным для базальтовых систем $K_D(\text{Fe-Mg})^{\text{Ol-Melt}} = 0.30 \pm 0.03$ (Putirka, 2008; Roeder, Emslie, 1970) и, зная состав оливина, можно оценить магниальность расплава по содержанию Fe-минала для каждого морфологического типа оливина.

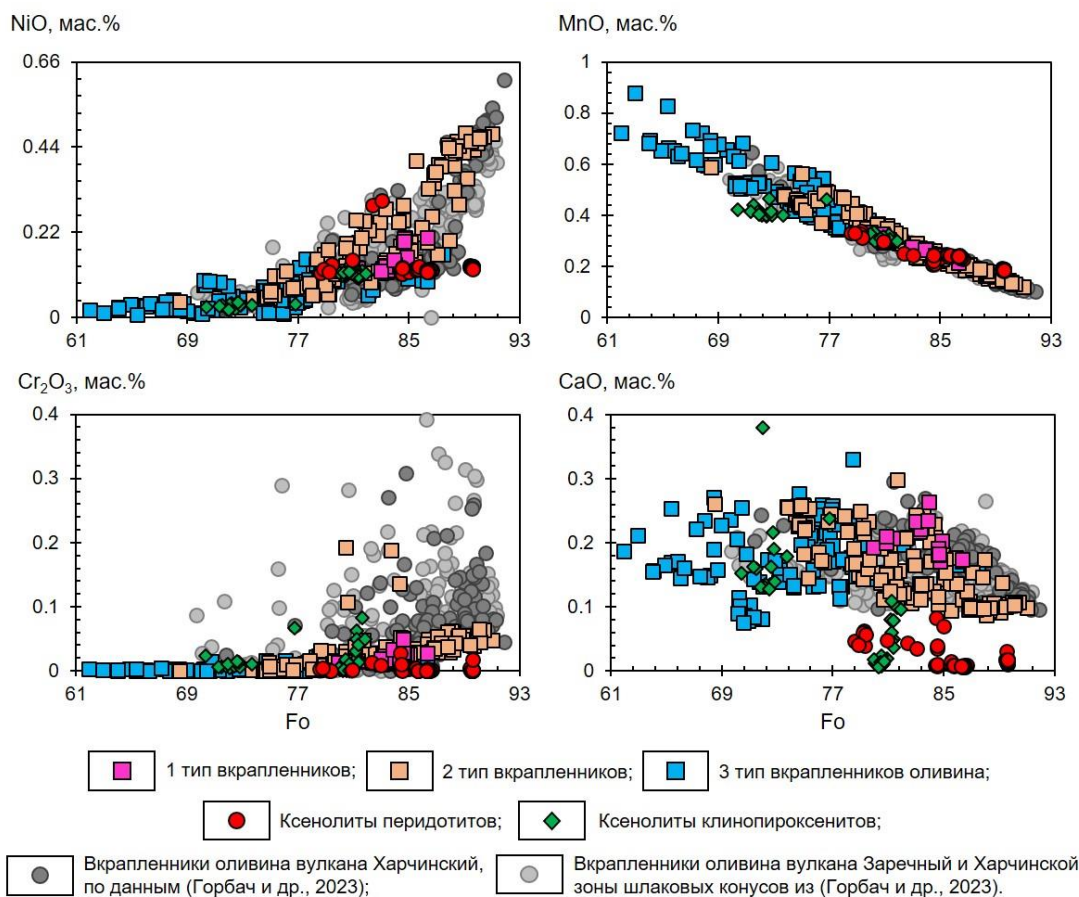


Рис. 3. Состав трех типов вкрапленников оливина из базальтов и андезибазальтов вулкана Харчинский. Для сравнения приведены составы оливина из ксенолитов вулкана Харчинский, а также вкрапленников оливина из лав вулкана Харчинский и высокомагнезиальных базальтов вулкана Заречный и Харчинской зоны шлаковых конусов, по данным (Горбач и др., 2023).

Результаты исследования вкрапленников оливина первого типа и центральных зон второго типа предполагают, что их можно считать автокристами. Они характеризуются широкими вариациями состава. Наиболее магнезиальный оливин Fo_{91} обнаружен в образце ХР-79, где он мог бы находиться в равновесии с расплавом, похожим на валовый состав породы. Магнезиальность этого расплава $Mg\# \approx 76$, что сопоставимо с магнезиальностью содержащей его породы $Mg\# = 73$.

По мере кристаллизации оливина магнезиальность расплава и вкрапленников постепенно уменьшается. Центральные зоны вкрапленников оливина второго типа образовывались из расплава с $Mg\# = 70$, что так же сопоставимо с магнезиальностью содержащих его пород $Mg\# = 71$. Тонкие краевые зоны вкрапленников второго типа неравновесны с валовым составом породы. Согласно оценке по кривой K_D , краевые зоны могли образоваться из более дифференцированного расплава с $Mg\# = 52$. Такие продвинутое по составу расплавы могли возникать на поздней стадии при кристаллизации основной массы и, вероятно, отражают неравновесный рост вследствие быстрого охлаждения. В то же время, постепенное повышение железистости и в целом наличие плавной зональности от ядер к краю может указывать на смешение с более эволюционировавшим расплавом, поступающим из камеры, в которой магма имела более высокую степень дифференциации.

Часть вкрапленников третьего типа, обнаруженная в образцах ХР-75 и ХР-85, в которых наиболее магнезиальный оливин имеет состав Fo_{77} , так же образовывалась из более дифференцированного расплава $Mg\# \approx 50$, что ниже магнезиальности содержащих их пород $Mg\# = 63$. Следовательно, они могут иметь антекристовую и/или ксенокристовую природу.

Таким образом, базальты и андезибазальты вулкана Харчинский являются результатом кристаллизационной дифференциации высокомагнезиального $Mg\# \approx 76$ базитового расплава, магнезиальность которого постепенно уменьшалась до $Mg\# = 52$. Этим объясняются широкие колебания составов вкрапленников оливина. При этом в некоторых породах наблюдается совмещение различных по происхождению зерен оливина, что указывает на смешение порций магмы, претерпевших различную степень дифференциации и, вероятно, из различных частей подводящей системы вулкана.

По содержанию примесных элементов в оливине можно оценить состав источника, из которого образовывались основные расплавы. Содержания Ni и Mn в наиболее магнезиальном оливине из пород вулкана Харчинский показывают, что основным источником вещества при образовании первичных расплавов являлся перидотит. Не исключается, что возможна примесь безоливинового компонента (Sobolev et al., 2007), в качестве которого могли выступать как пироксениты мантийного клина, так и пироксениты нижней части островодужной коры (Jull, Kelemen, 2001; Некрылов и др., 2018).

На основе петрографических особенностей пород выяснено, что близликвидусный парагенезис представлен оливином и Cr-шпинелью, которые позволяет оценить окислительно-восстановительный потенциал на ранних стадиях кристаллизации магм. Фугитивность кислорода варьирует от $NNO + 0.4$ до $NNO + 1.5$ по (Ballhaus et al., 1991; 1994) и соответствуют высокоокисленным условиям, характерным для субдукционных обстановок. Полученные оценки фугитивности кислорода близки соответствующим параметрам для других вулканов Курило-Камчатской (Кузьмин и др., 2023; Volynets et al., 2023) и Малой Антильской (Heath et al., 1998) островных дуг.

Оценка температуры кристаллизации ликвидусных минералов проводилась по двум геотермометрам. Температура равновесия оливина с расплавом по модели (Ford et al., 1983) варьирует от 1150 до 1290°C. Следует отметить, что при расчете не учитывалось содержание воды, поэтому оценки температур могут быть завышены. Дополнительно температура оценивалась с помощью модели (Coogan et al., 2014), основанной на распределении Al между оливином и шпинелью, которое не чувствительно к содержанию воды в расплаве. Полученные по этой модели температурные значения кристаллизации ликвидусной ассоциации варьируют в диапазоне от 1115 до 1185°C.

Вкрапленники оливина обычно второго и третьего типа содержат первичные расплавные включения. Включения, как правило, частично или полностью раскристаллизованные, темные в проходящем свете. В процессе прогрева во включениях наблюдалось плавление дочерних кристаллических фаз в интервале температур 1100 – 1200°C. Однако растворения газового пузыря и полной гомогенизации включений достичь не удалось. Это может быть связано с потерей летучих компонентов, содержащихся в расплаве, при подъеме магмы к поверхности и в процессе извержения (Portnyagin et al., 2008; Mironov et al., 2015).

Для достижения наиболее полного переплавления дочерних кристаллов и растворения отложившегося на стенках включения вещества, родственного минералу-хозяину, был выполнен массовый прогрев включений без визуального контроля. После прогрева в большинстве включений сохраняется газовый пузырек, часто в присутствии рудной фазы, представленной, вероятно, ксеногенным хромитом. Редко встречаются полностью стекловатые включения. Стекло в большинстве таких экспериментально закаленных включений имеет низкоглиноземистый и низкокальциевый состав. При этом с повышением количества SiO_2 в нем увеличиваются содержания MgO и Cr_2O_3 , концентрации TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaO и MnO уменьшаются, а содержания щелочей остаются практически постоянными.

Измеренные составы стекол использовались для восстановления составов захваченных расплавов. Для этого результаты рентгеноспектрального микроанализа пересчитывались с учетом постзахватного переуравновешивания SiO_2 , воды, FeO и MgO в программе Petrolog3 (Danyushevsky, Plechov, 2011) и по алгоритмам (Portnyagin et al., 2019).

После реконструкции захваченные расплавы имеют низкомагнезиальный, низкоглиноземистый, низкокальциевый состав. По сравнению со стеклами включений эти расплавы обеднены SiO_2 . По сравнению с валовым составом пород захваченные расплавы обогащены TiO_2 и MnO и содержат сопоставимые концентрации Al_2O_3 и щелочей.

Чтобы оценить состав первичных расплавов, проводились расчеты уравнивания состава расплава с оливином Fo_{90} с учетом постзахватной кристаллизации оливина на стенках включений (обратная кристаллизация оливина). Это позволяет уравновесить захваченные расплавы с более магнезиальным составом по сравнению с оливином-хозяином. Для реконструкции состава первичных расплавов использовались стекла пяти расплавных включений из наиболее магнезиальных $\text{Fo}_{\geq 85}$ вкрапленников оливина первого и второго типа. Расчеты проводились при заданном давлении с учетом содержаний воды по (Danyushevsky, 2001). Реконструированные первичные расплавы имеют высокомагнезиальный, низкоглиноземистый и низкокальциевый базитовый состав. По содержанию K_2O они относятся к умеренно калиевой серии. По сравнению с валовым составом пород реконструированные первичные расплавы обогащены MgO и Cr_2O_3 , деплетированы SiO_2 , Al_2O_3 и MnO , и в то же время они содержат сопоставимые с породами концентрации K_2O , Na_2O и TiO_2 . Содержания CaO в первичных расплавах заметно варьируют. Это связано с тем, что в выборку могли попасть вкрапленники оливина, которые кристаллизовались одновременно с клинопироксеном. Можно ожидать, что содержание CaO в исходных расплавах сопоставимо с его концентрациями в валовых составах базальтов, на что указывают два включения в Fo_{89-90} . Магнезиальность реконструированных расплавов в равновесии с Fo_{91} составляет $\text{Mg\#} \approx 73$, что сопоставимо с приведенными выше оценками $\text{Mg\#} \approx 76$ по составу оливина, а также с магнезиальностью расплава для ксенолита дунита XP-11 ($\text{Mg\#} \approx 73$) и превышает соответствующие значения для остальных ксенолитов.

Для оценки содержаний воды в исходных расплавах применялась модель (Gavrilenko et al., 2016), основанная на зависимости коэффициента распределения CaO между расплавом и оливином от концентрации H_2O . Согласно этой модели, содержание воды в реконструированных захваченных расплавах изменяется от 1.5 – 2.8 мас.% во включениях из Fo_{89-90} до 4.0 – 5.5 мас.% во включениях из Fo_{85-86} .

Для учета влияния диффузионной потери воды из включений на оценку ее содержаний в захваченном расплаве применялась методика (Portnyagin et al., 2019). Однако расчеты удалось провести только для ограниченного числа стекол включений. Это может быть связано с тем, что стекла не претерпели потерю SiO_2 , и/или это косвенно указывает на присутствие в изученных породах антекристов и/или ксенокристов оливина, что затрудняет применение данной методики. Для тех оливинов, где расчет оказался возможен, содержания воды достигают 5.7 мас.%. В целом, диапазон вариаций полученных содержаний близок интервалу по (Gavrilenko et al., 2016). Однако содержания для конкретных включений иногда заметно отличаются друг от друга.

С помощью рамановской спектроскопии и согласно результатам криометрических экспериментов, в газовых пузырях расплавных включений была обнаружена малоплотная (0.19 г/см^3) углекислота без значимой примеси других газов.

Содержание серы в реконструированных составах захваченных расплавов не превышает 0.1 мас.%, что ниже концентрации насыщения базальтовых расплавов, согласно экспериментальным данным (Mathez, 1976; Naughton, 1974).

Полученные данные позволяют сформулировать **первое защищаемое положение**:

Ликвидусная ассоциация магнезиальных базальтов и андезибазальтов вулкана Харчинский представлена оливином и хромистой шпинелью, которые кристаллизовались в окисленных условиях $\text{NNO}+0.4 - \text{NNO}+1.5$ при температуре 1115 – 1185°C из высокомагнезиального ($\text{Mg\#} \approx 76$), низкоглиноземистого и низкокальциевого базитового расплава, содержащего 1.5 – 2.8 мас.% воды.

Для базальтов и андезибазальтов оценки давления были получены при моделировании в программе Petrolog3 (Danyushevsky, Plechov, 2011). Для этого использовалась опция «кристаллизация» при заданном значении фугитивности кислорода $\text{NNO} + 1.0$. В процессе производился подбор значений давления, при которых состав ликвидусного оливина совпадал с наиболее магнезиальными значениями F_0 для каждого конкретного образца. В результате этого выяснилось, что наиболее магнезиальные составы вкрапленников оливина хорошо воспроизводятся в двух интервалах давлений. Для образцов ХР-1, ХР-76, ХР-78, ХР-79 и ХР-108 (наибольшие значения F_0 варьируют от 78 в ХР-108 до 91 в ХР-79) составы оливина восстанавливаются при давлениях 0.1 – 1.5 кбар. Для образцов ХР-2, ХР-84 и ХР-87 (наибольшие значения F_0 изменяются от 86 в ХР-87 до 89 в ХР-2 и ХР-84) состав вкрапленников воспроизводится при значениях давления 11 – 13 кбар. Для образцов ХР-75, ХР-80, ХР-85, ХР-109 и ХР-110 (наибольшие значения F_0 варьируют от 80 в ХР-80 и ХР-110 до 72 в ХР-75) моделируемые составы оливина предполагают, что помимо кристаллизации при давлениях 4 – 14 кбар необходимо предварительное фракционирование от 9 до 12% расплава.

Оценка давления кристаллизации вкрапленников амфибола из трахиандезибазальтов нека проведена по содержанию Al в нем (Hollister et al., 1987). Давление изменяется от 5 до 7 кбар. Наличие в этих породах ксенолитов глубинных пород предполагает, что трахиандезибазальты нека тоже могут иметь мантийный источник. При этом перед извержением исходный расплав претерпел кристаллизацию в промежуточных камерах, соответствующих давлению 5 – 7 кбар.

Полученные оценки давлений позволяют сформулировать **второе защищаемое положение:**

Высокомагнезиальные базальтовые магмы вулкана Харчинский кристаллизовались, по крайней мере, на двух глубинных уровнях, соответствующих давлениям 0.1 – 1.5 и 11 – 13 кбар, в то время как камера трахиандезибазальтов нека находилась на глубине, отвечающей давлению 5 – 7 кбар.

ГЛАВА 5. КСЕНОЛИТЫ ГЛУБИННЫХ ПОРОД ВУЛКАНА ХАРЧИНСКИЙ

Породы ксенолитов состоят из оливина, клинопироксена, оксидных минералов, амфибола, реже ортопироксена и плагиоклаза, количественные соотношения которых заметно варьируют. Эти минералы в работе отнесены к первичному парагенезису. Согласно (Петрографический кодекс..., 2009), породы ксенолитов представлены перидотитами и клинопироксенитами. К перидотитам отнесены четыре ксенолита, в составе которых присутствует оливин. Они представлены клинопироксеновым дунитом ХР-11, шпинель-амфиболовым верлитом ХР-14, шпинелевым верлитом ХР-38 и шпинелевым лерцолитом ХР-51. Клинопироксениты представлены анхимономинеральными ХР-63, оливиновыми ХР-62, оливин-плагиоклаз-магнетитовыми ХР-36, плагиоклаз-амфибол-магнетитовыми ХР-29 и амфиболовыми ХР-23 разностями.

Интерстиции и трещины в ксенолитах заполнены тонкозернистым агрегатом, сложенным хлоритом, плагиоклазом, баритом, ангидритом, фторапатитом, Ti-магнетитом и некоторыми другими минералами. Минералы, входящие в состав прожилков и интерстициальных обособлений, вероятно, образуются в результате наложенных процессов и иногда замещают первичные минералы, поэтому они отнесены автором к вторичному парагенезису.

Составы оливина (Рис. 4), клинопироксена и амфибола из пород ксенолитов образуют несколько групп по магнезиальности. В целом составы минералов из перидотитов имеют более магнезиальный состав по сравнению с клинопироксенитами. Наиболее магнезиальные минералы присутствуют в дуните ХР-11 (первая группа на Рис. 4). Их составы близки соответствующим минералам мантийных ксенолитов с вулканов Авачинский (Тимина и др.,

2012; 2015; Ishimaru et al., 2007), Шивелуч (Bryant et al., 2007), Безымянный (Щербаков, Плечов, 2010; Ionov et al., 2013) и надсубдукционных пород (Ishii et al., 1992; Pearce et al., 2000), отличаясь от них только более низкими содержаниями NiO. Минералы в остальных ксенолитах имеют составы, похожие на составы соответствующих минералов из ксенолитов клинопироксенитов Камчатки, а также островодужных кумулятивных пород (Daczko et al., 2012).

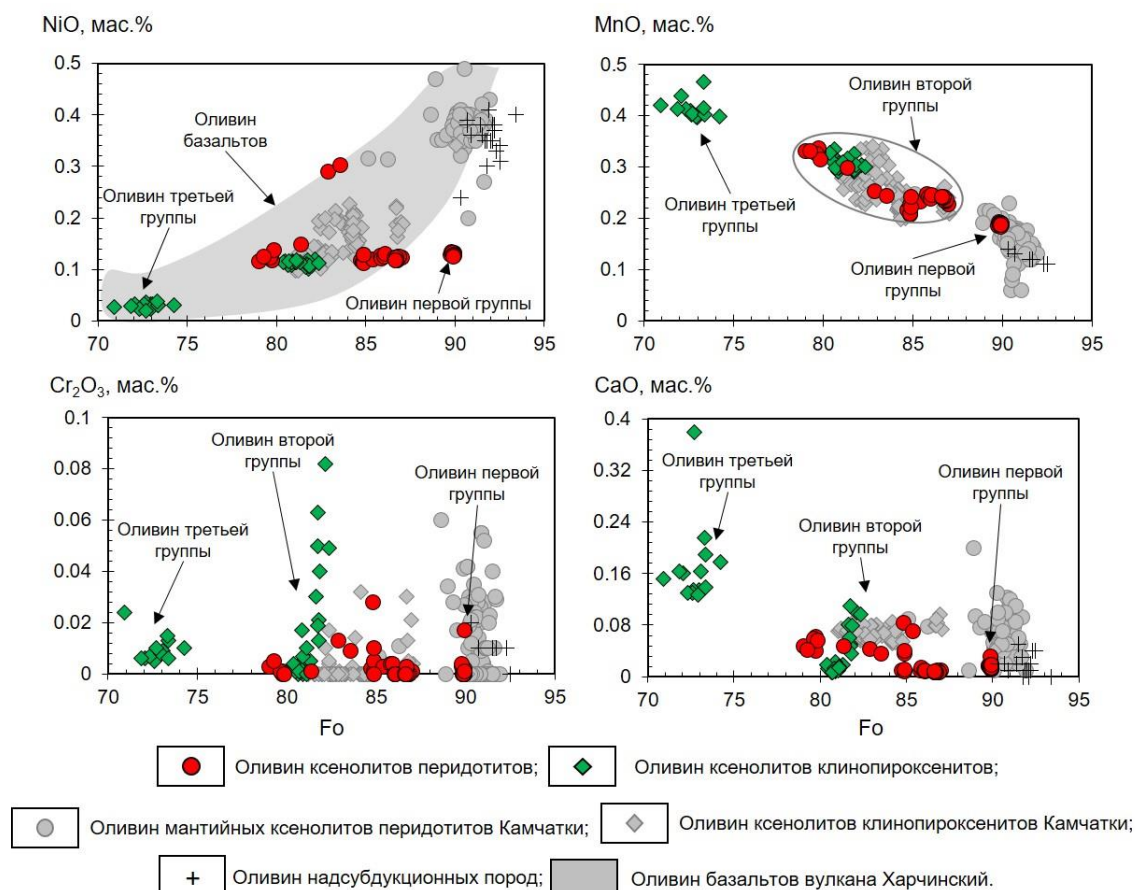


Рис. 4. Состав оливина из ксенолитов перидотитов и клинопироксенитов вулкана Харчинский. Для сравнения приведены составы оливина из ксенолитов вулканов Авачинский (Тимина и др., 2012; 2015; Ishimaru et al., 2007), Шивелуч (Bryant et al., 2007), Безымянный (Щербаков, Плечов, 2010; Ionov et al., 2013) и надсубдукционных пород (Ishii et al., 1992; Pearce et al., 2000).

Концентрации несовместимых элементов в различных зонах зерен клинопироксенов близки и с учетом коэффициентов распределения клинопироксен-расплав (Bédard 2014) позволяют реконструировать соотношения редких и рассеянных элементов в равновесных с ним расплавах. Нижняя граница содержаний несовместимых элементов в реконструированном расплаве близка к содержаниям некогерентных элементов в ксенолитах вулкана Харчинский. Верхняя граница рассчитанных концентраций близка к содержаниям редких элементов в магнезиальных базальтах этого вулкана. Это может указывать на то, что образование кумулятов происходило из магм, родственных магнезиальным базальтам.

Составы пород ксенолитов соответствуют семействам ультраосновных и основных пород нормальной щелочности (Петрографический кодекс..., 2009). Породы обогащены крупно-ионными литофильными элементами и Sr и обеднены Th, Nb, Ti и Zr-Hf (Рис. 2). Большинство элементных отношений в ксенолитах варьирует в значительных пределах: $(Ba/La)_N = 4 - 60$; $(Ba/Th)_N = 4 - 89$; $(Th/La)_N = 0.4 - 1.2$ и $(Sr/Nd)_N = 1.3 - 6.2$. Эти значения обычно выше, чем в ксенолитах перидотитов вулканов Авачинский и Шивелуч (Ishimaru et

al., 2007; Ionov, 2010). При этом состав дунита XP-11 отличается от остальных ксенолитов обогащением MgO и NiO и обедением CaO (Рис. 5). Он также характеризуется низкими содержаниями редких элементов, при этом наблюдается обогащение LREE (La/Yb)_N=8.9 (Рис. 2).

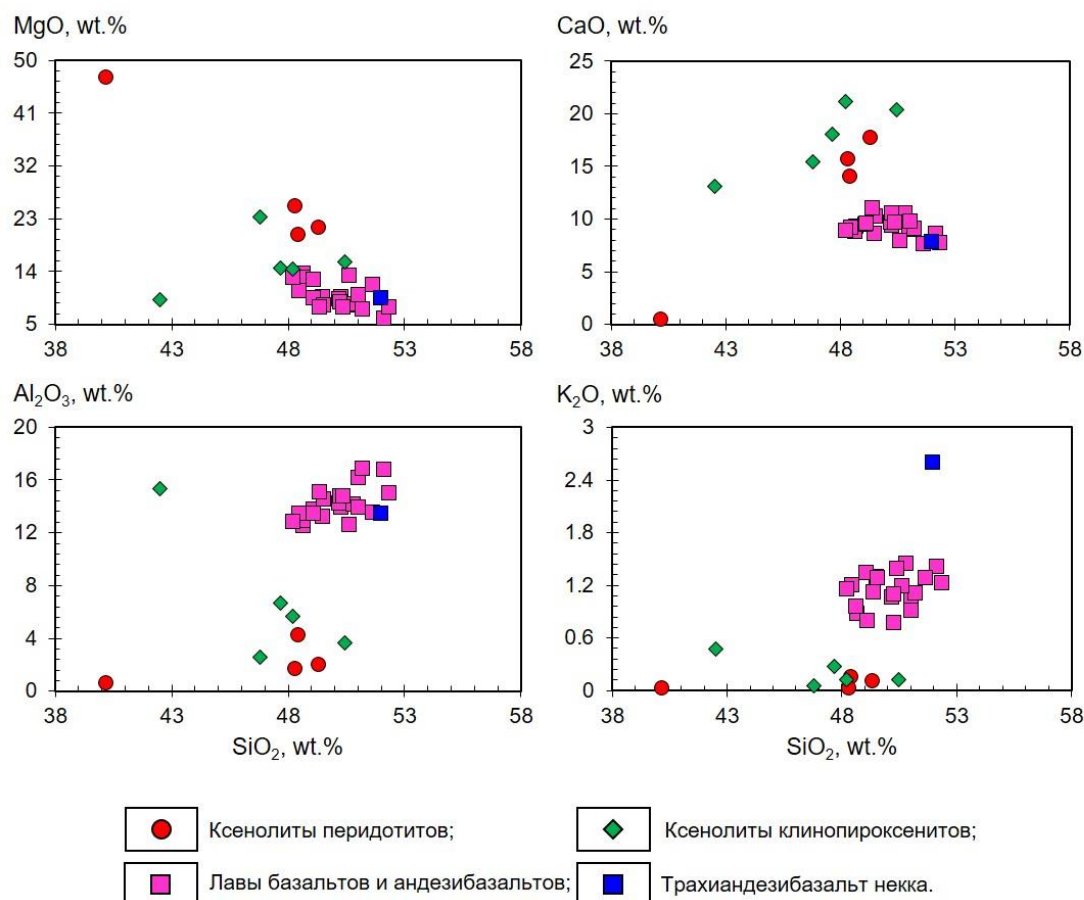


Рис. 5. Валовые составы пород ксенолитов в сравнении с базальтами и андезибазальтами вулкана Харчинский.

Полимодальность составов минералов, характер распределения несовместимых элементов в клинопироксенах, а также сходство валового состава пород с кумулятивными гипербазитами субдукционных обстановок указывают на то, что большая часть изученных ксенолитов имеют кумулятивное происхождение. И только дунит XP-11 можно с оговорками рассматривать в качестве образца мантийных пород.

Оливин-шпинелевые пары из перидотитов показывают температурный интервал 1075 – 1150°C по геотермометру (Fabries, 1979). Сопоставимые оценки температур 1090 – 1140°C получены с помощью оливин-клинопироксенового геотермометра (Loucks, 1996). Оценки фугитивности кислорода для дунита XP-11, полученные с помощью Ol-Sp-пар (Ballhaus et al., 1991; 1994), достигают значений $\text{NNO} + 0.6$. Остальные перидотиты показывают еще более окисленные условия $\text{NNO} + 2.4$ до $\text{NNO} + 3.7$ при заданном давлении 10 кбар.

Породы ксенолитов интерпретируются нами как кумулаты магматических расплавов. Таким образом, амфибол является одним из позднемагматических минералов, образование которого связано с кристаллизацией интеркумулусного расплава. В связи с этим для оценки РТ-параметров образования минералов интеркумулуса использовались плагиоклаз-амфиболовый геотермометр и Al-амфиболовый геобарометр. Амфибол-плагиоклазовый геотермометр (Holland, Blundy, 1994) показывает температурный интервал 780 – 820°C.

Согласно Al-амфиболовому геобарометру (Hollister et al., 1987), давление варьирует от 2 до 7 ± 1 в перидотитах и от 6 до 10 ± 1 кбар в клинопироксенитах. Следует отметить, что давление, оцененное по амфиболовому геобарометру для изученных ксенолитов, сопоставимо с полученными выше при моделировании значениями давления для базальтов.

Полученные оценки давлений указывают на наличие под вулканом Харчинский нескольких уровней промежуточных камер, расположенных в разных частях земной коры. Отчасти такое предположение находит свое подтверждение в результатах исследования подводящих систем вулканов Ключевской группы на Камчатке (Koulakov et al., 2017) и заложено в основу моделей миграции расплавов и флюидов в надсубдукционной литосфере (Добрецов и др., 2012).

Обогащение пород несовместимыми элементами, вероятно, связано с присутствием интеркумулусных амфибола и плагиоклаза, а также присутствием в прожилках минералов-концентраторов (например, апатит, титанит, эпидот) этих компонентов.

Минералы вторичного парагенезиса (барит, ангидрит и некоторые другие минералы), по-видимому, образовались в процессе гидротермальной переработки ксенолитов. Эти преобразования могли происходить при относительно низких температурах $\sim 400 - 950^{\circ}\text{C}$.

Полученные данные позволяют сформулировать **третье защищаемое положение**:

Большинство ксенолитов из трахиандезибазальтов вулкана Харчинский представлено кумулятивными перидотитами и клинопироксенитами, образовавшимися при давлениях 2 – 7 и 6 – 10 кбар соответственно в окисленных условиях $\text{NNO}+2.4 - \text{NNO}+3.7$ и температурном диапазоне от $1075 - 1150^{\circ}\text{C}$ до $780 - 820^{\circ}\text{C}$ из расплавов сходных по геохимическим характеристикам с высокомагнезиальными базальтами этого вулкана.

ГЛАВА 6. ПЕТРОГЕНЕЗИС ПОРОД ВУЛКАНА ХАРЧИНСКИЙ

Большинство исследователей считает, что источником островодужных вулканических пород являются метасоматизированные перидотиты мантийного клина (Kushiro, 1975; Gill, 1981; Tatsumi, 1989). Поток флюидов, поступающий из субдуцирующей плиты, вызывает плавление на разных уровнях, что, при соответствующих степенях плавления, способствует образованию базальтовых расплавов (Kushiro, 1975; Gill, 1981; Stern, 2002). Увеличение мощности коры по мере развития островной дуги создает благоприятные условия для дифференциации магм на разных глубинах. Предполагается, что такие условия могут появляться благодаря развитию под вулканом Харчинский транскоровой магматической системы. Согласно (Cashman et al., 2017), транскоровая магматическая система – это питающая вулкан система, простирающаяся через всю толщу земной коры и характеризующаяся наличием областей с различным соотношением кристаллы/расплав. В зонах субдукции в течение длительного времени возможна периодическая генерация однотипных глубинных магм, которые либо скапливаются у границы Мохо, либо, используя ослабленные зоны, внедряются в нижние части земной коры, прогревая достаточно большие ее объемы и формируя транскоровые магматические системы, питающие активные вулканы. При этом возможны повторные инъекции новых порций близких по составу примитивных магм из глубинных очагов в менее глубинные, смешение дифференцированных расплавов более ранних импульсов с менее дифференцированными более поздних, т.е. создаются предпосылки для кристаллизации одних и тех же минералов из расплавов, претерпевших дифференциацию в различной степени (Cashman et al., 2017; Coote et al., 2019 и др.). Это согласуется с тем, что лавы вулкана Харчинский варьируют от высокомагнезиальных базальтов и андезибазальтов до более редких высокоглиноземистых базальтов и являются продуктами кристаллизационной дифференциации высокомагнезиального ($\text{Mg\#} \approx 76$), низкоглиноземистого, низкокальциевого базитового расплава. Оценки давлений по минералам глубинных кумулатов, вкрапленникам амфибола из трахиандезибазальта и результаты моделирования позволяют предполагать наличие под вулканом Харчинский

нескольких уровней промежуточных камер, расположенных на разных глубинах, соответствующих давлениям 0.1 – 1.5, 2 – 7, 6 – 10 и 11 – 13 кбар. При продвижении к поверхности порции разных инъекций базальтовых магм, дифференцированные в различной степени на различных глубинах, могут смешиваться друг с другом. В результате этого магнезиальные базальты и андезибазальты содержат различные по происхождению вкрапленники оливина: автокристы, кристаллизовавшиеся непосредственно из расплава, антекристы, образованные на более ранних этапах дифференциации аналогичных по составу магм, и ксенокристы, являющиеся продуктами дробления стенок подводящих каналов вулкана. В качестве ксенокристов так же могут захватываться минералы ксенолитов, которые в большом количестве присутствуют в трахиандезибазальтах вулкана Харчинский. Наиболее магнезиальные зерна минералов, по-видимому, образуются из наименее дифференцированных расплавов в глубинных камерах. Часть из них может оседать, образуя кумулаты. Остальные представлены в породах автокристами. Если такое зерно попадет в более дифференцированный расплав, тогда появляется зональность. Если смешиваются порции базальтового расплава с различной степенью дифференцированности сформируется вкрапленник, уравновешенный с расплавом, являющимся результатом этого смешения. В то же время более примитивные порции расплавов, не испытывавшие дифференциации на глубине, проходя через менее глубинные камеры, могут захватывать ранее образованные кристаллы, отвечающие более высоким степеням дифференциации. В таком случае мы наблюдаем присутствие в породах антекристов с обратной зональностью. Не исключены также случаи, когда ядро антекриста может быть уравновешено с расплавом менее дифференцированным, чем транспортирующий. В этом случае антекристы будут иметь прямую зональность.

Изучение ксенолитов в трахиандезибазальте нека показало, что среди мантийных пород в подчиненном количестве встречаются дуниты. Большинство изученных ксенолитов – это кумулятивные перидотиты и клинопироксениты, образовавшиеся в окисленных условиях $\text{NNO}+2.4 - \text{NNO}+3.7$ при давлениях 2 – 10 кбар, возможно, из магм, родственных по составу магнезиальным базальтам. Самые высокие температуры образования минералов первичного парагенезиса ксенолитов близки к 1150°C . Интеркумулусный расплав кристаллизовался при $780 - 820^{\circ}\text{C}$. Впоследствии породы ксенолитов подвергались гидротермальной переработке. Эти преобразования могли происходить при относительно низких температурах $\sim 400 - 950^{\circ}\text{C}$.

Так как ксенолиты, включая мантийные породы, были вынесены на поверхность трахиандезибазальтом нека, можно предполагать, что его исходные магмы также зарождались в мантии. Наличие ксенолитов не позволяет предполагать для трахиандезибазальтовой магмы эволюцию в большом количестве промежуточных камер. Несмотря на это барометрия по амфиболу дает, по крайней мере, один коровый уровень в 5 – 7 кбар. Следует отметить, что трахиандезибазальт отличается от базальтов и андезибазальтов вулкана Харчинский наличием вкрапленников водосодержащих минералов, а также повышенным содержанием некогерентных элементов. Повышенные содержания K_2O и отличия в содержаниях некоторых HFSE могут быть связаны с тем, трахиандезибазальты должны иметь первичную магму иного состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автором работы проведено исследование уникального проявления надсубдукционных магнезиальных базальтов, слагающих конус вулкана Харчинский. Благодаря обилию глубинных ксенолитов в породе нека была изучена глубинная часть магматической системы, питающей вулкан. Кроме того, автору удалось реконструировать состав первичных расплавов, из которых происходило образование магнезиальных базальтов и андезибазальтов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. **Секисова В.С.**, Смирнов С.З., Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Корово-мантийные ксенолиты: минералогия и петрогенезис // Геология и геофизика, т. 62, № 3, 2021, p. 422–442, DOI: 10.15372/GiG2020118.
2. **Секисова В.С.**, Смирнов С.З., Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Происхождение вкрапленников оливина и мантийные источники магнезиальных базальтов вулкана Харчинский (Центральная Камчатская депрессия) // Геология и геофизика, 2025, online first, с. 1–19, DOI: 10.15372/GiG2025163.
3. Smirnov S.Z., Nizametdinov I.R., Timina T.Y., Kotov A.A., **Sekisova V.S.**, Kuzmin D.V., Kalacheva E.G., Rashidov V.A., Rybin A.V., Lavrenchuk A.V., Degterev A.V., Maksimovich I.A., Abersteiner A. High explosivity of the June 21, 2019 eruption of Raikoke volcano (Central Kuril Islands); mineralogical and petrological constraints on the pyroclastic materials // Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 418, 2021, 107346, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107346.
4. Nizametdinov I.R., Smirnov S.Z., Shevko A.Ya., Kuzmin D.V., Kotov A.A., **Sekisova V.S.**, Timina T.Yu. High-alumina daughter phases in olivine-hosted melt inclusions from Kudryavy and Menshiy Brat volcanoes (Medvezhia caldera, Iturup island) // Russian Journal of Pacific Geology, № 4, 2024, p. 410–435, 10.1134/s1819714024700131.

Тезисы докладов на всероссийских и международных конференциях:

5. **Sekisova V.S.** Mineralogy of pyroxenite and peridotite xenoliths from magnesian basalts of the Kharchinsky volcano, Kamchatka // Moscow International School of Earth Sciences - 2016. Abstracts of International conference / М.: GEOKHI RAS, 2016, p. 103–104.
6. **Секисова В.С.** Включения метасоматизирующих сред в минералах ксенолитов вулкана Харчинский (Восточная Камчатка) // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии, посвященной 80-летию со дня рождения д-ра геол.-минерал. наук Ф.Г. Рейфа, Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016, с. 135–138.
7. **Секисова В.С.**, Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Гора М.П., Смирнов С.З. Температуры метасоматических преобразований мантийных пород по результатам исследования включений минералообразующих сред и минеральной термометрии глубинных ксенолитов вулкана Харчинский, Восточная Камчатка // Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции с участием исследователей из других стран, Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017, с. 210–211.
8. **Sekisova V.S.**, Kuzmin D.V., Shevko A.Ya., Gora M.P., Smirnov S.Z. Temperature of metasomatic alteration of the deep xenoliths from Kharchinsky volcano on the basis of mineral thermobarometry and inclusion study // Proceedings of International School of Earth Sciences – 2017, Miass, Mineralogical Institute UrB RAS.
9. **Секисова В.С.**, Смирнов С.З., Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Расплавные включения в оливине и клинопироксене из магнезиальных базальтов вулкана Харчинский (Камчатка) // Материалы X Всероссийской школы молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия», г. Черноголовка, 2019, с. 125–127.
10. **Sekisova V.S.**, Smirnov S.Z., Kuzmin D.V., Shevko A.Ya., Gora M.P. Mineralogy and thermometry of deep xenoliths from the Kharchinsky volcano (Central Kamchatka Depression) // Proceedings of 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018), 2018.
11. **Sekisova V.S.**, Smirnov S.Z., Kuzmin D.V., Shevko A.Ya., Gora M.P. Inclusions of metasomatic media in minerals of mantle xenoliths from the Kharchinsky volcano (Kamchatka) // Asian Current Research on Fluid Inclusions VII (ACROFI VII), Beijing, September 11-17, 2018, Abstract Volume, p. 113–114.
12. **Секисова В.С.**, Смирнов С.З., Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Включения расплава во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана Харчинский // Материалы XIX Всероссийской конференции по термобарогеохимии, Новосибирск (Россия), 2022, с. 85–86.
13. **Секисова В.С.**, Смирнов С.З., Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Происхождение вкрапленников из магнезиальных базальтов вулкана Харчинский (Центральная Камчатская депрессия) // Материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал», Новосибирск (Россия), 2023, с. 171–172.
14. **Секисова В.С.**, Смирнов С.З., Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Вкрапленники оливина из магнезиальных базальтов и андезибазальтов вулкана Харчинский (Центральная Камчатская депрессия) // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит», Владивосток (Россия), 2023, с. 318–321.