

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

НИЗАМЕТДИНОВ Ильдар Рафитович

**ПЕТРОГЕНЕЗИС ПОСТКАЛЬДЕРНЫХ ВУЛКАНИТОВ КАЛЬДЕРЫ
МЕДВЕЖЬЯ НА ПРИМЕРЕ ВУЛКАНА МЕНЬШИЙ БРАТ, О. ИТУРУП**

1.6.3 – «Петрология, вулканология»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Научный руководитель
кандидат геолого-минералогических наук
Дмитрий Владимирович Кузьмин

Новосибирск – 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Список принятых сокращений.....	11
ГЛАВА 1. ПОСТКАЛЬДЕРНЫЙ ВУЛКАНИЗМ В СОВРЕМЕННЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОЯСАХ	13
1.1. Современные сведения о кальдерном и посткальдерном вулканизме ...	13
1.2. Геологическая изученность кальдеры Медвежья	16
ГЛАВА 2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ КАЛЬДЕРЫ МЕДВЕЖЬЯ И ВУЛКАНА МЕНЬШИЙ БРАТ	21
ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	27
3.1. Методы термобарометрии	28
3.1.1. Особенности термометрических экспериментов в оливине.....	29
3.1.2. Особенности термометрических экспериментов с включениями кислых расплавов	31
3.2. Минералого-геохимические методы исследований.....	32
3.2.1. Рентгено-спектральные методы	32
3.3.2. Методы масс-спектрометрии.....	35
3.3.3. Методы КР-спектроскопии	39
ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ПОРОДЫ ВУЛКАНА МЕНЬШИЙ БРАТ И ИХ ИСТОЧНИКИ	42
4.1. Петрография и минеральный состав посткальдерных базальтов	42
4.3. Химический состав основных пород.....	47
4.3. Ликвидусная ассоциация базальтов.....	51
4.3.1. Включения минералообразующих сред во вкрапленниках оливина	58
4.3.2. Высокоглиноземистая ассоциация дочерних минералов в расплавных включениях.....	59
4.3.3. Термометрия расплавных включений в оливине.....	66

4.3.4	Химический состав стекол расплавных включений.....	67
4.3.5.	Содержание воды в расплавах.....	74
4.4.	ОСНОВНЫЕ МАГМЫ И ИХ ИСТОЧНИК.....	78
4.4.1.	Состав и особенности первичных расплавов.....	78
4.4.2.	Летучие компоненты в первичном расплаве.....	80
4.4.3.	Температуры кристаллизации ликвидусного парагенезиса.....	84
4.4.4.	Температура и глубина образования флюида.....	85
4.4.5.	Состав оливина и состав источника.....	87
4.4.6.	Температура и степень плавления мантийного субстрата.....	89
4.5.	ВЫВОДЫ ОБ ИСХОДНЫХ ОСНОВНЫХ РАСПЛАВАХ И ИХ ИСТОЧНИКАХ.....	93
4.6.	ПОЗДНЯЯ АССОЦИАЦИЯ ВКРАПЛЕННИКОВ ОСНОВНЫХ ПОРОД.....	95
4.6.1.	Включения минералообразующей среды в пироксене и плагиоклазе.....	98
4.6.2.	Химический состав включений минералообразующей среды в плагиоклазе.....	100
4.6.3	Расплавные включения в пироксенах.....	102
4.6.4.	Химический состав расплавных включений в пироксенах.....	104
4.6.5.	Летучие компоненты в расплавных включениях в пироксене и плагиоклазе.....	104
4.7.	ОБРАЗОВАНИЕ ПОЗДНЕЙ АССОЦИАЦИИ.....	106
4.7.1.	Температура кристаллизации вкрапленников поздней ассоциации.....	106
4.8.	ВЫВОДЫ ПО УСЛОВИЯМ ОБРАЗОВАНИЯ ПОЗДНЕЙ АССОЦИАЦИИ ВКРАПЛЕННИКОВ	112
ГЛАВА 5. СИНКАЛЬДЕРНЫЕ ПОРОДЫ.....		113
5.1.	ПЕТРОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ.....	113
5.2.	ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОД.....	117
5.3.	ВКЛЮЧЕНИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ СРЕД.....	119
5.3.1.	Расплавные включения в кварце.....	119
5.3.2.	Расплавные включения в плагиоклазе.....	120
5.3.3.	Расплавные включения в пироксенах.....	124
5.3.4.	Летучие компоненты во включениях.....	126

5.4. Происхождение синкальдерных пород	127
5.4.1. Риолитовые пемзы	129
5.4.2. Андезиты купола.....	134
5.5. Выводы о генолизе синкальдерных вулканитов	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
6.1. Новейшие данные по составу летучих компонентов в магмах	137
6.1.1. Применение данных ГХ-МС для реконструкции состава и свойств флюидов в магмах кальдеры Медвежья	145
6.2. Петрогенетическая модель посткальдерного вулканизма.....	147
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА	179
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	183

Введение

Кальдерообразующие извержения вызывают особенный интерес в связи со своей сильной эксплозивностью и большими объемами изверженного материала. Крупные кальдерные извержения характеризуются объемами выброшенного вещества в десятки и сотни км³. Самыми известными в истории человечества катастрофическими событиями являются извержения Кракатау (1883) (Self, Rampino, 1981; Carey et al., 2001), Тамбора (1815) (Oppenheimer, 2003; Self et al., 2004), Катмая в 1912, Пинатубо в 1991, извержения Везувия и Мон-Пеле.

Кальдерный вулканизм наиболее характерен для субдукционных областей. Основное количество работ по кальдерному вулканизму в надсубдукционных обстановках посвящены наиболее крупным извержениям вулканов Тоба (Williams et al., 2009), Пинатубо (Koyaguchi, Ohno, 2001), Санторин (Cadoux et al., 2014; Druitt, 2014), Тамбора и Кракатау.

Природа вулканизма, связанного с периодическими образованиями кальдер, является предметом давних и широких дискуссий. Одним из важнейших вопросов является длительность формирования очагов кальдерных извержений и особенности их питания. Несмотря на то, что образование кальдер протекает в относительно короткий период времени, процесс подготовки такого извержения и последующий вулканизм могут охватывать от одного до нескольких миллионов лет. Именно поэтому большое внимание уделяется крупным кальдерам, возраст которых менее миллиона лет. Особенно к тем, где активно проявляется посткальдерный вулканизм.

Посткальдерным или интракальдерным вулканизмом называют извержения вулканических аппаратов, происходящие после главной фазы кальдерообразования внутри контура обрушения. Он характерен для многих крупных кальдер и является свидетельством того, что магматический очаг остается активным и при благоприятных условиях способен привести к повтору катастрофического извержения.

Кальдера Медвежья на севере о. Итуруп является примером долгоживущего центра вулканической активности в пределах Курило-Камчатской островной дуги. Интерес к ее изучению связан с открытием уникальной минерализации в современных высокотемпературных источниках вулкана Кудрявый, которая выражается в накоплении редких элементов (Re, W, Mo), цветных металлов (Pb, Cu, Zn), а также золота (Остапенко, 1997; Дистлер и др. 2002; Чугаев и др., 2007; Yudovskaya et al., 2008; Кременецкий, Чаплыгин, 2010).

Посткальдерная вулканическая активность в данном районе представлена рядом разновозрастных вулканических центров, где происходили излияния андезитовых, андезибальтовых и базальтовых лав (вулканы Медвежий, Средний, Кудрявый, Сиреневый, Меньший Брат).

Актуальность работы. Изучение происхождения и эволюции крупных кальдер вызывает большой научный интерес в связи с катастрофичностью связанных с ними извержений и большим влиянием на экосистему планеты (Borisova et al., 2005; Chesner, Luhr, 2010; Lane et al., 2013). Необходимо отметить, что наиболее крупные катастрофические извержения связаны с кислым вулканизмом, в связи с чем причины и условия образования больших объемов кислых магм под современными островными дугами являются чрезвычайно актуальной проблемой.

Изучение состава и P-T параметров эволюции исходных мантийных и коровых магм позволяют оценить их роль в формировании крупных кальдер в надсубдукционных останковках. Прямые данные о составе и P-T параметрах отделяющихся от расплавов газов оказывают большую помощь в понимании динамики катастрофических извержений и могут помочь в определении источников вещества при формировании уникальной рудно-магматической системы кальдеры Медвежья.

На сегодняшний день кальдеры Курильской островной дуги изучены слабо, самой крупной из которых является кальдера Медвежья (Рыбин и др., 2018). Среди всех посткальдерных построек в ней выделяется вулкан Меньший Брат, лавовые потоки которого представлены магнезиальными базальтами, которые позволяют

реконструировать составы мантийных магм и условия их генерации. Эти базальты формировались из наименее измененных мантийных расплавов, послуживших источником тепла и летучих компонентов при образовании приповерхностного очага кислой магмы, что могло привести к кальдерообразующему извержению.

Объект исследования. Основным объектом исследования являются плейстоцен-голоценовые эффузивы, слагающие купол и лавовые потоки вулкана Меньший Брат.

Цель работы: установить происхождение и эволюцию расплавов, участвовавших в образовании комплекса вулканических пород от базальтов до риолитов, слагающих вулкан Меньший Брат.

Основные задачи исследования:

1. Определение химического состава пород и породообразующих минералов, слагающих вулканическую постройку вулкана Меньший Брат.

2. Поиск и классификация включений минералообразующих сред во вкрапленниках вулканических пород, слагающих вулкан Меньший Брат. Определение P-T параметров кристаллизации и составов минералообразующих расплавов, из которых кристаллизовались вкрапленники

3. Определение содержания летучих компонентов в магмах, участвовавших в образовании вулкана Меньший Брат.

4. Определение состава и параметров образования исходных магм, которые участвовали в образовании вулкана Меньший Брат с применением современных подходов к изучению включений минералообразующих сред во вкрапленниках эффузивных горных пород.

5. Построение петрологической модели образования вулкана Меньший Брат.

Фактический материал:

В основу работы легла представительная коллекция образцов изверженных пород, слагающих синкальдерные и посткальдерные вулканы кальдеры Медвежья, отобранная в ходе полевых работ 2014 г. на о. Итуруп. Для исследования было использовано 26 образцов пород вулкана Меньший Брат, среди которых 21 образец базальтов и андезибазальтов, слагающих лавовые потоки, 4 – образцы купола

вулкана и 1 образец пемзовых туфов у основания вулкана. Для минералогических исследований и работы с включениями минералообразующих сред было изготовлено более 26 петрографических шлифов, более 50 термобарогеохимических пластинок. Для рентгеноспектрального анализа минералов вкрапленников и исследования валового газового состава расплавных включений в минералах методом ГХ-МС было отобрано более 50 мономинеральных проб. В ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН) было выполнено 19 анализов пород на главные элементы методом РФА и 17 анализов пород на редкие и редкоземельные элементы методом ICP MS. Методом ICP MS с лазерным пробоотбором вещества выполнено 32 анализа минералов и стекол РВ. Методом КР спектроскопии проведено 48 определений составов газовой фазы РВ и качественного и количественного определения воды в стеклах РВ. Выполнено более 800 анализов главных и некоторых редких элементов в минералах пород и стеклах РВ методами рентгеноспектрального микроанализа. Проведено 75 термометрических экспериментов по гомогенизации РВ. Выполнено 5 определений редких, редкоземельных элементов и летучих компонентов в стеклах РВ методом ВИМС в филиале ФТИАН РАН, г. Ярославль.

Научная новизна:

Полученные данные и результаты проведенного исследования включений минералообразующих сред позволили оценить соотношение кристаллизационной дифференциации, плавления и смешения в магматических процессах, приведших к образованию вулкана Меньший Брат.

Впервые оценены параметры генерации мантийных магм, участвовавших в образовании вулкана Меньший Брат.

Впервые определен состав летучих компонентов и оценены исходные концентрации воды и параметры дегазации первичных расплавов. Установлена высокая роль углеводородных соединений в составе летучих компонентов.

Защищаемые положения:

1 – Ликвидусная ассоциация базальтов вулкана Меньший Брат представлена оливином (Fo_{85-90}) и хромистой шпинелью ($Cr\# 0,46-0,60$). Её кристаллизация протекала при температуре 1090-1220 °С, фугитивности кислорода на уровне кислородного буфера $NNO+0,3$ лог. ед. и содержании воды в расплаве до 5 мас. %. Исходные расплавы, из которых кристаллизовались оливин и шпинель имели пикробазальтовый состав.

2 – Вкрапленники плагиоклаза, энстатита и авгита являются ксенокристами для базальтов вулкана Меньший Брат. Они кристаллизовались в кислом расплаве при температуре 895-1190 °С и фугитивности кислорода, соответствующей кислородному буферу $NNO+3$ лог. ед. Эти расплавы соответствуют низкокалийевым дацитам.

3 – Всё разнообразие пород вулкана Меньший Брат образовано при взаимодействии базитовой магмы, образовавшейся при плавлении мантийного клина, и кислой магмы, образовавшейся при плавлении островодужной коры.

Практическая значимость.

Полученные данные будут существенным вкладом в понимание процессов мантийно-корового взаимодействия, протекающих в пределах южной части Курильской островной дуги, их связи с вулканизмом, кальдеро- и рудообразованием.

Апробация работы и публикации.

По материалам работы опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК. Результаты работы опубликованы в 11 тезисах докладов на русском и английском языках и прошли апробацию на таких международных конференциях как: European current research on fluid Inclusions (2017), Всероссийская конференция по термобарогеохимии (2016, 2018), 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes, Петрология магматических и метаморфических комплексов 2017.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и включает в себя 68 рисунков и 4 таблицы. Приложение содержит 18 таблиц с большими массивами аналитических данных. Список литературы состоит из 233 наименований.

Благодарности. Автор искренне выражает благодарность научному руководителю к.г.-м.н., с.н.с. лаб. 436 Дмитрию Владимировичу Кузьмину за помощь в выборе объекта исследований, постановку задач, поддержку при выполнении исследований и при интерпретации полученных результатов. Отдельная благодарность выражается Сергею Захаровичу Смирнову за многочисленные ценные рекомендации в ходе работы; Татьяне Юрьевне Тиминой за помощь в проведении аналитических работ. За предоставление коллекции образцов, которая является фактическим материалом данной работы благодарность выражается А.Я. Шевко, М.П. Горе, С.З. Смирнову, Т.Ю. Тиминой и Дмитрию Владимировичу. Большую помощь и многочисленные рекомендации по работе внесли сотрудники лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН: Шохонова Л.А., Секисова В.С., Шарыгин В.В., Старикова А.Е., Котов А.А., Максимович И.А., Бульбак Т.А., во главе с заведующим лабораторией - Анатолием Алексеевичем Томиленко.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-35-90038, 16-05-00894, 18-05-00819), а также Министерства науки и высшего образования РФ по государственному заданию ИГМ СО РАН. Исследование состава расплавных включений и реконструкция составов расплавов выполнены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 (соглашение 075-15-2020-802).

Список принятых сокращений

ВДС – волно-дисперсионная спектрометрия (микрондовый анализ)

ЭДС – энерго-дисперсионная спектрометрия

КР – комбинационное рассеяние (спектроскопия комбинационного рассеяния)

РФА – рентгено-флуоресцентный анализ

ICP MS – масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой

LA ICP MS – масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой с лазерным пробоотбором вещества

ВИМС – вторично-ионная масс-спектрометрия

ГХ – газовая хроматография

ГХ МС – газовая хромато-масс-спектрометрия

РВ – расплавные включения

ФВ – флюидные включения

Ст – стекловатая фаза во включении

Гп – газовый пузырьёк

Кр – кристаллическая фаза включений

T_{гом} – температура гомогенизации

T_{пл} – температура плавления

РЗЭ – редкоземельные элементы

РЭ – редкие элементы

Мас. % - массовые проценты

Отн. % - относительные проценты

Мол. % - мольные проценты

Ф.е. – формульные единицы

Лог. ед. – логарифмические единицы

Mg# – индекс магнезиальности $Mg\# = 100MgO / (MgO + FeO_{tot})$ в мольных количествах

ANK – индекс глиноземистости $ANK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$

ACNK – индекс глиноземистости $ACNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$

Сокращенные названия минералов и миналов

Pl – плагиоклаз

Ab – альбит $NaAlSi_3O_8$

An – анортит $CaAl_2Si_2O_8$

Ol – оливин

Fo – форстерит Mg_2SiO_4

CPx - клинопироксен

OPx – ортопироксен

Enst – энстатит $Mg_2Si_2O_6$

Fs – ферросилит $Fe_2Si_2O_6$

Woll – волластонит $Ca_2Si_2O_6$

Rho – рёнит

Sp – шпинель

Qtz – кварц SiO_2

Mgt – магнетит $FeFe_2O_4$

Глава 1. Посткальдерный вулканизм в современных вулканических поясах

1.1. Современные сведения о кальдерном и посткальдерном вулканизме

Образование кальдер, крупных кольцевых депрессий, в областях активного вулканизма связано с извержением большого количества магматического материала. Это приводит к проседанию верхней части вулканической постройки и погружению ее в освободившуюся от магмы часть камеры (Acocella, 2007; Cashman, Giordano, 2014). Наиболее крупные кальдеры проседания связаны с развитием очагов средней и кислой магмы, состав которой может варьировать от андезитов до риолитов, но преобладают магмы кислого, дацитового, риодацитового и риолитового состава. Подавляющее большинство кальдер такого типа расположено в областях надсубдукционного магматизма (De Silva, 1989; Cole, 1990; Yoshida, 2001).

В настоящее время считается, что образование крупных очагов кислых магм и их последующих катастрофических извержений может происходить несколькими способами:

1) Возникновение кислых расплавов может происходить при кристаллизационной дифференциации основных магм, в некоторых случаях осложненной ассимиляцией коровым веществом (Альмухамедов, Медведев, 1995; Grove et al., 2003; Gertisser, Keller, 2000; Леонов, Гриб, 2004). При этом образование больших объемов кислых магм исключительно путем дифференциации вызывает обширные дискуссии (Bachmann, Bergantz, 2006; Gelman et al., 2013)

2) Крупные очаги кислых магм могут образовываться при плавлении коровых пород под воздействием тепла мафических магм, вызывающего либо плавление ранее образованных пород земной коры, либо приводящего к разжижению богатой кристаллами магмы (mush). Последнее способствует увеличению подвижности магмы и ее способности к извержению. (Beard, Lofgren,

1991; Tamura, Tatsumi, 2002; Dufek, Bergantz, 2005). Мафические магмы являются источником летучих компонентов, в первую очередь воды. В этой ситуации отделение летучих будет способствовать процессам частичного плавления вмещающих пород, разжижению и разогреву богатой кристаллами магмы кислого очага (Bachmann, Bergantz, 2006) и повышению давления в кислом очаге.

3) При внедрении в кислый коровый очаг мафические магмы могут служить триггером кальдерообразующих извержений (Sparks et al., 1977; Eichelberger, Izbekov, 2000; Ponomareva et al., 2004, Plechov et al., 2010)

Эти механизмы могут эффективно работать в разных обстановках как вместе, так и порознь, и роль каждого из них является предметом активных научных дискуссий (Bachman, Bergantz, 2006; Brophy, 2008).

В реализации всех этих механизмов особая роль отводится магмам базальтового состава. Считается, что эти магмы являются результатом плавления пород мантийного клина, испытавших метасоматическое воздействие флюидов, отделяющихся от погружающейся плиты (Parman, Grove, 2004). Таким образом, они могут нести как тепло, необходимое для образования кислых расплавов (независимо от того, какой механизм доминирует), так и вещество (расплавы и флюиды).

Широко распространено мнение, что расплавы кислого состава являются результатом фракционной кристаллизации базитовых и андезитовых магм. Однако для того, чтобы из базальтовой магмы получить расплавы риолитового состава, нужно закристаллизовать более 70 мас. % расплава (Miyagi et al, 2017; Marxer et al., 2022). Малый объем и низкая проницаемость кристаллической матрицы не позволят в этой ситуации кислому расплаву отделиться от нее (Bachmann, Bergantz, 2008). Большие объемы изверженного материала, составляющие десятки и сотни кубических километров, заставляют предположить гигантские, часто нереальные, объемы исходной базальтовой магмы. В случае, когда кислые расплавы являются продуктом кристаллизационной дифференциации, наиболее вероятными

исходными магмами должны быть магмы андезитового состава или же базальтовые магмы, контаминированные коровым материалом. О. Бахманом и Дж. Берганцем (Bachman, Bergantz, 2007, 2008) предложена модель магматической «каши» - смеси расплавов и продуктов их кристаллизации, в которой доля кристаллов составляет 40 – 60 об. %. Исходно эта смесь должна иметь базитовый или андезитовый состав, а остаточные расплавы кислого состава должны располагаться в интерстициальном пространстве. Извлечение расплава происходит путем выдавливания при уплотнении кристаллического материала. В этом процессе важную роль могут сыграть интрузии более горячей и насыщенной флюидами базитовой магмы. Внедряясь в «кашу», они могут вызывать разогрев и разжижение расплава (Bachman, Bergantz, 2003). Такой же эффект будет давать просачивание отделяющихся от базитовой магмы флюидов (Bachman, Bergantz, 2006).

Возникновение расплавов в процессе частичного плавления коровых пород не раз предлагалось для образования больших объемов кислых пород, в том числе и для формирования очагов кальдерных вулканов. На основании изотопно-геохимических данных коровое происхождение приписывается расплавам очага вулкана Тоба, с которым связано самое крупное эксплозивное извержение голоцена (Chesner, 1998). На основании данных по минералогии и расплавленным включениям в минералах пемз перешейка Ветрового также выдвинуто предположение, что возникновение расплавов перешейка Ветрового связано с частичным плавлением метабазитов коры острова Итуруп (Смирнов и др., 2017). Однако сам процесс частичного плавления и дальнейшей сегрегации расплавов требует значительных затрат тепловой энергии, носителями которой могут быть базитовые магмы. Кроме этого, глубинные базитовые магмы, образовавшиеся в зонах субдукции, испытывают дегазацию при подъеме к поверхности (Plank et al., 2013), и отделяющийся водный или водосодержащий флюид делает процесс частичного плавления более эффективным.

О значимой роли базитовых магм в формировании кальдер свидетельствует тот факт, что в строении большинства крупных кальдер принимают участие

вулканы, сложенные преимущественно лавами и пирокластикой, составы которых варьируют от базальтов до андезитов. Как правило, эти вулканы образуются на посткальдерном этапе и могут располагаться внутри депрессии, показывая тем самым, что их очаги пространственно сопряжены с очагом кальдерного извержения. Примерами таких вулканов являются сопряженные с кальдерами вулканы Горелый и Карымский (Леонов, Гриб, 2004), Опала (Мелекесцев, 2016), Немо (Мелекесцев и др., 1997). Увеличение объемов продуктов извержения основного состава на посткальдерном этапе развития отмечается для кальдерного вулкана Ксудач (Volynets et al., 1999). К кальдерам, в которых после крупномасштабных кальдерообразующих извержений развивается базальтовый и андезитовый вулканизм, относится и кальдера Медвежья.

1.2. Геологическая изученность кальдеры Медвежья

Одно из ранних описаний кальдеры Медвежья в литературе приводится Горшковым Г.С. в 1967 году. В этой монографии (Горшков, 1967), посвященной вулканизму Курильской дуги, обобщены данные о составе и взаимоотношениях пород, слагающих эту кальдеру. Сомма кальдеры сложена двупироксеновыми андезитами, а потоки внутрикальдерных вулканов сложены базальтами и андезибазальтами с вкрапленниками плагиоклаза, пироксенов, оливина. Синкальдерные вулканы представлены дацитовыми и, реже, андезитовыми пемзами. Согласно геоморфологическим наблюдениям, возраст внутрикальдерных базальтовых потоков соответствует голоцену.

В последние десятилетия наибольший интерес кальдера Медвежья вызывает наличием действующей рудно-магматической системой с уникальным минералогическим составом (Дистлер и др. 2002, Кременецкий, Чаплыгин 2010, Yudovskaya et al., 2008). Она приурочена к фумарольным полям, расположенным в вершинных кратерах вулкана Кудрявый. Основное внимание этих исследований кальдеры Медвежья было направлено на выяснение источников рудного вещества

вулкана Кудрявый и его связи с материалом мантийного происхождения и субдуцируемой океанической корой и океаническими осадками.

При изучении изотопии свинца ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - 15,57-15,43$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - 18,42-18,30$) в канницарите, галените в конденсатах фумарольных газов вулкана Кудрявый (Чугаев и др. 2007) показано, что источником летучих компонентов в высокотемпературных флюидах может являться относительно гомогенный плавящийся мантийный клин с подчиненным количеством вещества из погружающейся океанической плиты.

Предыдущие исследования кальдеры Медвежья были посвящены описанию геологии, последовательности вулканических событий, выяснению происхождения основных магм и определению их источников (Коваленко и др. 2004, Толстых и др. 1997, Чибисова и др. 2009; Чугаев и др., 2007; Остапенко, 1997; Ермаков, Семакин, 1996; Дистлер, 2002; Кременецкий, Чаплыгин, 2010; Ермаков, Штейнберг, 1999; Рыбин и др., 2018; Martynov et al., 2022). Однако породы кислого состава, достаточно широко представленные в продуктах вулканической деятельности кальдеры, в большинстве своем оставались за рамками исследований. В этом отношении нам представляется очень интересным вулкан Меньший Брат, расположенный в центральной части кальдеры. Вулкан представляет собой андезит-дацитовый экструзивный купол, на который в западной и восточной части насажены два пирокластических конуса, сложенных тefрой базальтового и андезибазальтового состава. С ними связаны лавовые потоки, спускающиеся на запад и юг от вулканической постройки и также имеющие базальтовый и андезибазальтовый состав. Вулкан Меньший Брат представляет собой свидетельство участия мантийных магм в образовании кальдеры. Его пространственная совмещенность с экструзией кислого состава, близость их геологического возраста (Чибисова и др., 2009) говорят о том, что в процессе эволюции вулканического очага происходило взаимодействие мантийных магм с образованиями коры острова Итуруп.

Ранее породы вулкана и включения в минералах были изучены для реконструкции процессов кристаллизации и определения источников мантийных магм (Толстых и др., 1997; Коваленко и др., 2004). В этих работах показано, что посткальдерные лавы вулкана Меньший Брат содержат вкрапленники оливина с $Mg\#$ достигающей 90 мол. %, что подтверждает их мантийное происхождение. Авторами этих работ было предложено несколько вероятных источников происхождения как основных, так и кислых серий пород, представленных в кальдере Медвежья. Предложенные источники магм представляют собой: а) мантийный клин для наиболее примитивных магм, б) для андезит-дацит-риодацитовых серий – в различной степени метасоматизированный мантийный клин с различной калиевой спецификой, в) для базальт-андезит-риодацитовых магм предполагаются так же различные степени плавления островодужной коры. Авторы отмечают, что при всей сложности строения кальдеры требуется более детальное изучение составов пород, минералов и включений в них для определения источников расплавов, участвующих в образовании вулканов кальдеры. В отношении пород базальт-андезит–дацитовой ассоциации ими было предположено возможное широкое участие процессов взаимодействия мантийных магм с материалом островодужной коры. Однако кислые породы были представлены только одним образцом кислой пемзы с подножия вулкана Меньший Брат. Таким образом, генезис кислых магм и роль мантийных расплавов в их образовании и эволюции остается дискуссионным вопросом в исследовании вулканизма кальдеры Медвежьей.

По данным многих исследований (Чибисова и др., 2009; Рыбин и др., 2000; Ермаков, Штейнберг, 1999; и др.) купол сложен порфировыми пироксен-плагиоклазовыми и кварц-пироксен-плагиоклазовыми дацитами. Характерной их особенностью является неоднородность по содержанию вкрапленников пироксенов и кварца в породах разных частей купола. В нижних частях экструзии купола кварцсодержащие разности дацитов преобладают, в сравнении с его вершинной частью.

Детальное исследование петрографии и минералогии лавовых потоков вулкана Меньший Брат проведено в работе (Чибисова и др., 2009). Показано, что эти потоки сложены хорошо раскристаллизованными порфировыми оливин-пироксен-плагиоклазовыми базальтами и андезибазальтами с интерсертальной основной массой.

Результат единичных исследований расплавных включений во вкрапленниках базальтов и андезибазальтов вулканов Кудрявый и Меньший Брат приводится в работе (Толстых и др., 1997). На основании состава расплавных включений в оливине, плагиоклазе и пироксенах выделяется три различных типа исходных расплавов, участвовавших в образовании лавовых потоков вулканов Меньший Брат и Кудрявый. По представленным данным расплав первого типа соответствует магнезиальному базальту (47-49 мас. % SiO_2 , 5-10 мас. % MgO), включения которого обнаружены в оливине и плагиоклазе. Данные термометрии расплавных включений базальтового состава позволяют оценить температуру их захвата порядка 1200-1300 °С.

Расплавы второго и третьего типа, обнаруженные во включениях в плагиоклазе и пироксенах, по составу соответствуют дацитам (64-70 мас. % SiO_2), однако они различаются по содержанию калия и подразделяются на высококалиевую и среднекалиевую группу. Температуры гомогенизации включений дацитового состава составляет 1070-1160 °С. Общим для всех трех типов расплавов является низкое содержание воды в расплаве (менее 1 мас. %).

Более подробное изучение включений минералообразующих сред во вкрапленниках базальтов и андезибазальтов кальдеры Медвежья было проведено В.И. Коваленко с соавторами (Коваленко и др., 2004). Расплавные включения в оливине по полученным данным имеют более основной состав (пикробазальтовый), и более высокое содержание магния (до 14 мас. % MgO) по сравнению с данными Толстых Н.Д. с соавторами. Составы стекол расплавных включений в пироксенах и в плагиоклазе сильно варьируют от базальтов до

риолитов (50-70 мас. % SiO₂). Также были получены данные о температурах гомогенизации расплавных включений, которые в целом согласуются с предыдущими оценками и составляют в оливине (1280-1330 °С), плагиоклазе (1070-1265 °С) и ортопироксене (1110-1215 °С). На основании составов расплавных включений было выделено четыре источника магм, участвовавших в образовании пород посткальдерного этапа.

Опубликованные составы пород и расплавных включений во вкрапленниках позволяют предполагать повсеместно проявленные процессы дифференциации и гибридизации магм при образовании посткальдерных базальтов и андезибазальтов. Однако до сих пор не выяснены составы и параметры образования исходных расплавов, а также характер их эволюции. Помимо этого, остаются неопределены содержания летучих компонентов в расплавах.

Глава 2. Геологическое строение кальдеры Медвежья и вулкана Меньший Брат

Кальдера Медвежья приурочена к фронту Курило-Камчатской островной дуги и локализована в Южной ее зоне на северо-восточной оконечности острова Итуруп (Рис. 1).

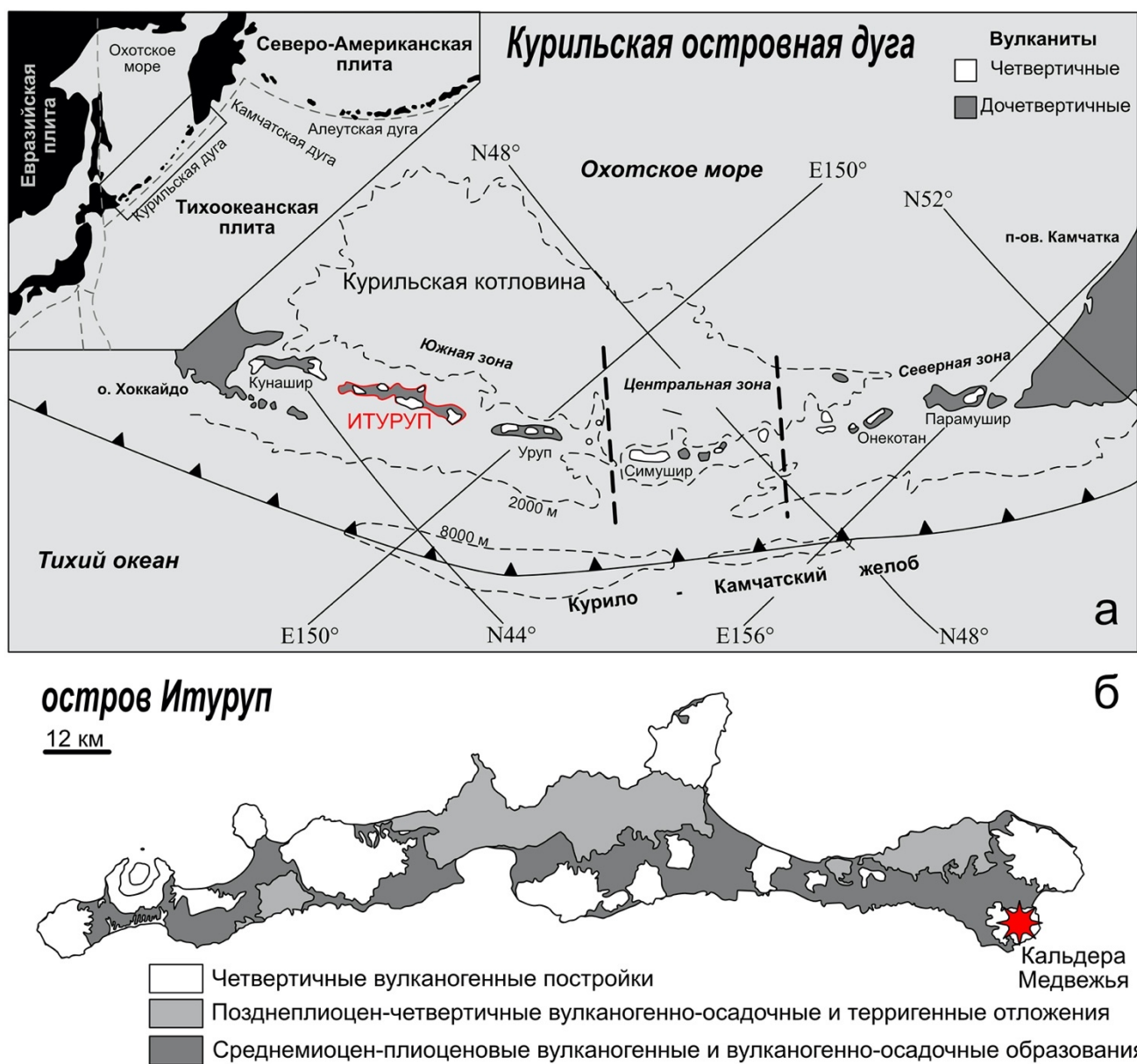


Рис. 1. Карта Курильской островной дуги (а) по (Martynov et al., 2010) и месторасположение кальдеры Медвежья в пределах о. Итуруп (б) (согласно (Федоров и др., 2021)).

Кальдера Медвежья представляет собой крупную депрессию размером 10x12 км с амплитудой обрушения порядка 600 м (Ермаков, Штейнберг, 1999). Она представляет собой сложную полигенную вулканическую структуру, в которую входят постройки вулканов Средний, Кудрявый, Медвежий, а также вулкан Меньший Брат (Рис. 2б). На сегодняшний день вулканическая активность сосредоточена в пределах вулкана Кудрявый и выражается в наличии большого количества фумарол и фумарольных полей, приуроченных к вершинным кратерам (Дистлер и др., 2002; Чугаев и др., 2006).

Кальдера Медвежья является долгоживущим центром вулканической активности и претерпела продолжительные и сложные этапы формирования. Выделяется три основных стадии эволюции этой кальдеры: докальдерная, связанная с образованием крупного стратовулкана; кальдерообразующая; и посткальдерная – формирование внутрикальдерных вулканов Медвежий, Средний, Меньший Брат, Кудрявый.

Фундамент кальдеры (Рис. 2б) сложен доплейстоценовыми породами вулканогенного и вулканогенно-осадочного происхождения мощностью более 450 м. Эти породы хорошо стратифицированы и представляют собой переслаивание туфов и редких лавовых потоков с терригенными песчаниками, гравелитами и алевrolитами (Ермаков, Штейнберг, 1999).

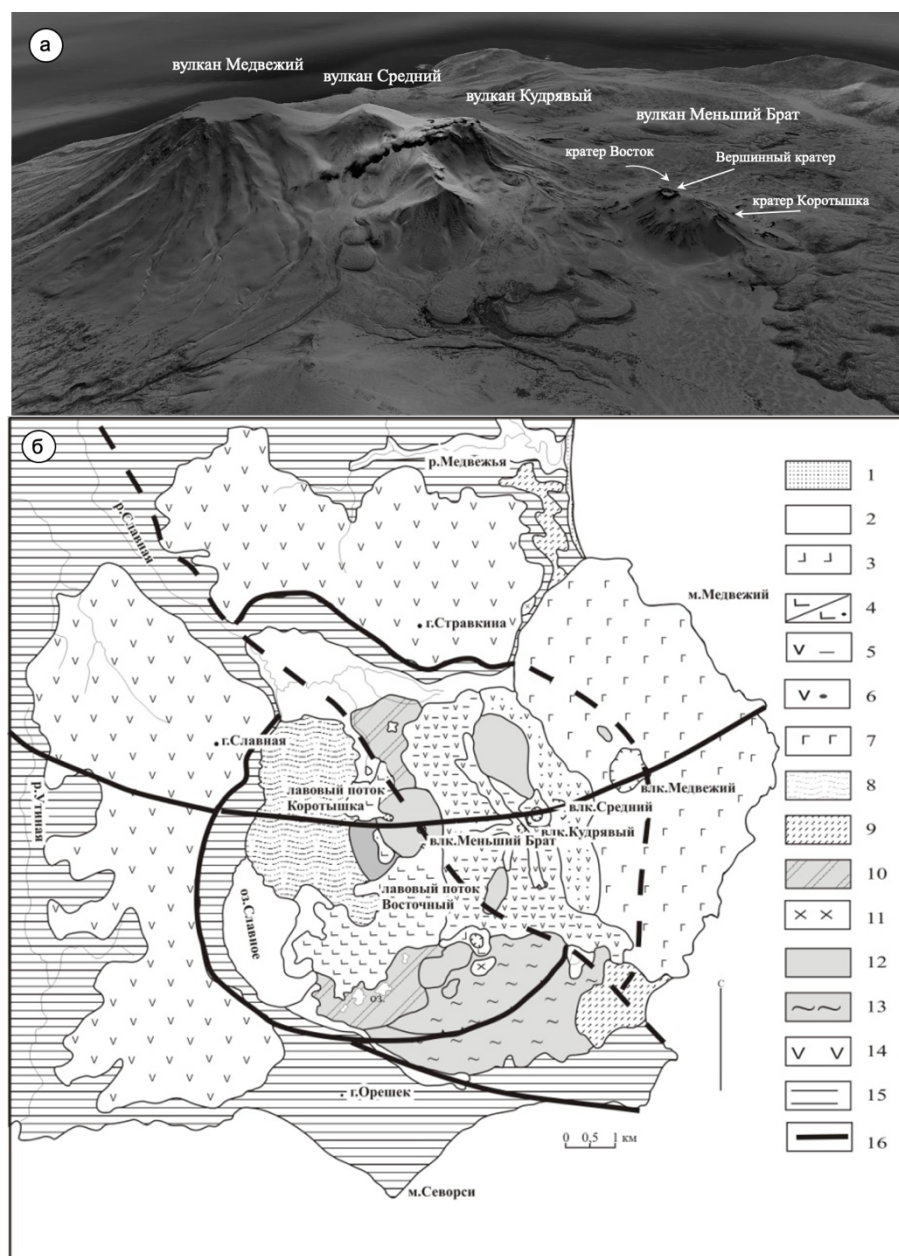


Рис. 2. Спутниковый снимок (а) и схема геологического строения кальдеры Медвежья (б) по (Рыбин и др., 2018): 1- Прибрежно-морские отложения; 2- аллювиальные и озеро-болотные отложения; 3- вулкан Короткий (глыбовые лавы андезибазальтов); 4- вулкан Маленький Брат а) преимущественно лавы основного состава, б) преимущественно шлаки средне-основного состава; 5- вулкан Кудрявый (лавы и туфы среднего состава); 6- вулкан Средний (лавы и туфы среднего состава); 7- вулкан Медвежий (лавы и туфы средне-основного состава); 8- нерасчлененный эффузивно-экструзивный комплекс преимущественно лавы и туфы средне-основного состава; 9- посткальдерные вулканогенно-осадочные образования (преимущественно пемзы и пемзовые пески); 10- поля распространения мелких экструзивных тел кислого состава; 11- субвулканические тела среднего состава; 12- субвулканические тела кислого состава; 13- фрагмент синкальдерного кратера); 14- сомма кальдеры Медвежья (преимущественно лавы средне-основного состава, реже туфы); 15- фундамент кальдеры Медвежья: пемзовые пески, туфы кислого состава, песчаники, алевролиты в северной и северо-восточной и гиалокластиты, лавы в южной части кальдеры; 16- основные разломы.

1. *Докальдерная стадия* характеризуется образованием крупного стратовулкана, лавовые потоки которого на сегодняшний день слагают гребни кальдеры Медвежья и плато вокруг нее. Эти породы сложены хорошо раскристаллизованными оливин-пироксен-плагиоклазовыми базальтами и андезибазальтами. Существующие оценки возраста их образования соответствуют эоплейстоцену, а абсолютный возраст базальтов, залегающих под синкальдерной пемзово-игнибритовой толщей, составляет $1,03 \pm 0,6$ млн. лет (K-Ar) (Ермаков, Штейнберг, 1999). Объем извергнутых пород докальдерного этапа оценивается в ~ 60 км³.

Базальты и андезибазальты докальдерного комплекса относятся к низкокалиевой серии. По своим петрохимическим характеристикам они соответствуют высокоглиноземистым базальтам (Al_2O_3 до 22 мас. %) и обладают наибольшими содержаниями алюминия, титана и кальция среди всех пород кальдеры Медвежья (Рыбин и др., 2018).

2. *Кальдерообразующая стадия* характеризуется мощной серией извержений, при которых образовалась сама депрессия, а также пемзово-игнибритовая толща дацит-риолитового состава мощностью до 250 м. Большая часть извергнутого кислого материала распространена за пределами кальдеры, внутри же кальдеры игнибриты обнажаются в южной ее части, а также в единичных обнажениях в центре депрессии. Оценки объемов извергнутого кислого материала сильно разнятся – от 12 м³ (Ермаков, Штейнберг, 1999) до 20-25 м³ (Мелекесцев и др., 1974).

В работе (Ермаков, Штейнберг, 1999) наиболее полно описано строение синкальдерной пемзово-игнибритовой толщи. В нижней ее части расположена пачка резургентных отложений, сложенная в основном грубообломочными туфобрекчиями мощностью 150-170 м. Среди обломков в этих туфобрекчиях присутствуют как базальты, так и обломки туфов среднего и кислого состава. Эти отложения взрывных извержений сверху перекрываются мощной, до 70 м, толщей

пемз сложного строения. В основании этой толщи расположены слои белых и светло-серых пемз с размерами отдельных обломков до 25 см, на которых залегают туфы и туффиты, а также слои галечников, песчаников и вулканогенно-осадочных пород. В верхней части толщи располагается слой туфоигнимбригов. Возраст наиболее поздних туфоигнимбригов оценивается в $0,41 \pm 0,1$ млн. лет (K-Ar) (Ермаков, Штейнберг, 1999), а весь процесс кальдерообразования укладывается в интервал от нижнего до среднего плейстоцена. Кальдерообразующая стадия завершалась внедрением крупных экструзий среднего и кислого состава. В это время образовались купола внутрикальдерных вулканов, в том числе и вулкана Меньший Брат.

Формирование кальдеры носило многоактный характер. Катастрофические взрывные извержения на начальном этапе, вероятно, сопровождали обрушение кровли стратовулкана, а извержения пемз, игнимбригов и внедрение экструзивных куполов, уже происходили в образованной крупной депрессии. Кратковременные перерывы в извержениях отражаются в накоплении слоев обломочных пород.

3. На посткальдерной стадии были образованы лавовые потоки и шлаковые конуса вулканов Медвежий, Средний, Меньший Брат и Кудрявый. Эти лавовые потоки являются результатом возрождения вулканической активности в пределах кальдеры. Абсолютная датировка наиболее ранних потоков вулкана Медвежий, перекрывающих синкальдерные игнимбриги, составляет $0,17 \pm 0,08$ млн. лет, что отвечает концу позднего плейстоцена (Ермаков, Штейнберг, 1999). А последнее извержение вулкана Кудрявый датировано 1883 г. (Коваленко и др., 2004).

Посткальдерный вулканизм характеризуется излияниями оливин-пироксен-плагиоклазовых, пироксен-плагиоклазовых базальтов, андезибазальтов и андезитов. По своим петрохимическим характеристикам они относятся к известково-щелочной низкокалиевой серии (Рыбин и др., 2018), а по данным В.И. Коваленко — это породы толеитовой серии (Коваленко и др., 2004). Вулканическая активность посткальдерного этапа продолжается и в настоящее время. Она

проявляется в виде многочисленных фумарол и высокотемпературных фумарольных полей вулкана Кудрявый (Рис. 2) с уникальной рениевой минерализацией (Чугаев и др., 2007; Остапенко, 1969).

Вулкан Маленький Брат (Рис. 2) имеет два основных структурных элемента. К ведущему структурному элементу относится крупное субвулканическое тело андезит-дацитового состава (купол вулкана) высотой 560 м и шириной около 800 м (Чибисова и др., 2009). Породы купола порфировые, во вкрапленниках преобладает плагиоклаз, также присутствуют пироксены и кварц (Ермаков, Штейнберг, 1999).

Следующим структурным элементом являются кратеры. В вершину купола врезаны три кратера – северо-западный, именуемый Коротышка, юго-восточный – Восток и Вершинный, находящийся между ними, из которого происходили выбросы шлаков основного состава, а из кратеров Коротышка и Восток происходили излияния лавовых потоков. Абсолютный возраст этих потоков не определялся, но по геоморфологическим данным он не превышает нескольких сотен лет. Эти потоки, сложенные порфировыми базальтами и андезибазальтами, являются главными объектами данного исследования.

Глава 3. Материалы и методы исследований

В основу работы положена коллекция плейстоцен-голоценовых изверженных пород кальдеры Медвежья, отобранная в ходе полевых работ 2014 г. сотрудниками ИГМ СО РАН на о. Итуруп. Рабочая коллекция включает 25 образцов эффузивов вулкана Меньший Брат, среди которых 4 образца относятся к синкальдерному куполу вулкана и 21 образец посткальдерных лавовых потоков; и 1 образец синкальдерных пемзовых туфов. Из этих образцов изготовлены петрографические шлифы и двусторонне полированные пластинки для термобарогеохимических исследований.

Подготовка проб к валовым анализам заключалась в истирании образцов без следов поверхностных изменений до состояния пудры. Истирание проводилось вручную в агатовой ступке с целью исключения контаминации пробы железом, что необходимо при подготовке проб базальтов к аналитическим исследованиям.

Для изучения РВ и использования локальных минералого-геохимических методов были отобраны монофракции минералов из большинства имеющихся образцов. Куски породы измельчались в ступке и расситовывались на фракции <0,25, 0,25-0,5, 0,5-1 и >1 мм. Отбор мономинеральных фракций в измельченных пробах проводился на стереоскопическом микроскопе МС-2 ZOOM (Микромед, Санкт-Петербург). В процессе исследования было отобрано 50 мономинеральных фракций оливина, пироксенов, плагиоклаза и кварца для проведения рентгеноспектральных, КР-спектроскопических и масс-спектрометрических исследований.

Для проведения рентгеноспектральных, а также LA ICP MS и ВИМС измерений зерна заливались в стандартные эпоксидные шашки диаметром 25 мм и срезались до середины зерен. Для проведения термометрических экспериментов с РВ из минеральных зерен изготавливались двусторонне полированные препараты. Шашки и препараты приполировывались, а контроль качества полировки

осуществлялся при использовании микроскопа с большим увеличением в отраженном свете.

3.1. Методы термобарометрии

Включения минералообразующих сред во вкрапленниках изверженных пород являются единственным прямым источником информации о составе и параметрах магм в магматических очагах. Поиск и классификация включений минералообразующих сред в минералах, а также оптическое исследование шлифов двусторонне полированных пластинок осуществлялись на поляризационном микроскопе BX51 XRF (Olympus Corp., Япония).

Термометрия флюидных и расплавных включений является одним из традиционных методов в изучении включений минералообразующих сред (Ермаков, Долгов, 1979; Рёддер, 1987; Соболев и др., 1996) и заключается в фиксации температур фазовых переходов внутри включения при нагревании. При термометрии расплавных включений наиболее важными фазовыми переходами являются: размягчение стекла, плавление кристаллических фаз, растворение газового пузырька и полная гомогенизация включения (Рёддер, 1987; Плечов, 2014).

Прогрев и закалка расплавных включений производилась на контрольно-измерительном комплексе ТК-1500, в систему которого входят блок питания, блок управления и термокамера конструкции Томиленко А.А. – Осоргина Н.Ю. (Осоргин, Томиленко, 1990). Управление комплексом происходит при помощи программного обеспечения MiTec-V, разработанного в ИГМ СО РАН. Данный комплекс позволяет проводить эксперименты по прогреву включений в интервале температур от комнатных до +1340 °С в инертных условиях. Термокамера эталонирована с использованием стандартных веществ марки ОСЧ с известными температурами плавления: NaCl с $T_{пл}$ 800,8 °С, Au° – 1064 °С, Mn° – 1246 °С. Визуальный контроль над ходом эксперимента производится в проходящем свете на поляризационном микроскопе Olympus BX51 с оптическим увеличением x100 и

x200. Этот микроскоп оснащен цифровой камерой для видеофиксации хода эксперимента.

3.1.1. Особенности термометрических экспериментов в оливине

Основной проблемой при проведении термометрических исследований является учет постзахватных изменений во включении. Температура гомогенизации может приниматься за минимальную температуру захвата этого включения (Рёддер, 1987), однако в наших образцах отчетливо проявлены процессы постзахватного изменения включений в оливине, выраженные в потере летучих компонентов (Portnyagin et al., 2008; Плечов, 2014), в первую очередь воды. Это выражено в наличии тонкой каймы, состоящей из субмикронных флюидных включений, вокруг многих расплавных включений. Потеря летучих компонентов сильно повышает температуру гомогенизации РВ и затрудняет проведение экспериментов по нагреву. При предельной температуре для термокамеры +1340 °С, не происходит полной гомогенизации РВ в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат.

С учетом потери летучих, прогрев РВ выполнялся до температуры плавления последней кристаллической фазы, после чего производилась закалка. Расплавные включения в оливине нагревались в аргоновой атмосфере, чтобы исключить окисление железа на поверхности пластинки. Закалка начиналась со скоростью 100 °С/сек до 700 °С, дальнейшее охлаждение с падением скорости. Время, затрачиваемое на прогрев и закалку включений в одном вкрапленнике оливина в эксперименте с визуальным контролем, не превышало 10 минут.

После проведения серии термических экспериментов по прогреву РВ с визуальным контролем ставились эксперименты по массовому прогреву включений без визуального контроля. Они проводились на высокотемпературной трубчатой печи Nabertherm в ГЕОХИ РАН (Крашенинников и др., 2018). Прогревы выполнялись при атмосферном давлении и специально подобранной фугитивности кислорода $NNO+0,3$ лог. ед., рассчитанной на основе оливин-шпинелевого

оксибарометра (Ballhaus et al., 1991). Платиновые ампулы с вкрапленниками оливина предварительно прогревались 5 минут при 800 °С, для насыщения ампул газовой смесью с целью предотвратить окисления железа на поверхности минерала. Далее, в безградиентной горячей зоне ампулы выдерживались при температуре 1300 °С в течение 5 минут. Финалом эксперимента является моментальная закалка РВ, достигаемая обрывом подвесной конструкции ампул и их резким падением в холодную воду. Эта методика позволяет получить в ходе одного эксперимента большое количество стекловатых экспериментально-закаленных расплавных включений для использования в дальнейших исследованиях.

Для определения состава захваченного расплава результаты рентгеноспектрального микроанализа экспериментально-закаленных стекол РВ пересчитывались с целью учета постзахватного переуравновешивания FeO и MgO между расплавом и оливином хозяином, а также учета кристаллизации/сплавления оливина-хозяина на стенках включений в программе Petrolog 3 (Danyushevsky et al., 2000; Danyushevsky, Plechov, 2011). В основу расчётов легла модель равновесия оливин-расплав (Ford et al., 1983), как самая точная из опубликованных моделей (Крашенинников и др., 2017). Было принято, что исходный расплав содержал 10,45 мас. % FeO. Это максимальное измеренное содержание железа в стекловатом природно-закаленном первичном РВ в оливине из вулканической бомбы. Предполагается, что в результате быстрой закалки, включения в ней претерпели минимальные постзахватные изменения в виде кристаллизации дочерних фаз и отложения вещества, родственного оливину-хозяину на стенках включения и Fe-Mg обмена при снижении температуры. Близкие оценки концентрации FeO в исходном расплаве 10,73-10,77 мас. % для базальтов вулкана Меньший Брат приведены и в работе (Коваленко и др., 2004).

Состав первичного расплава, из которого кристаллизовался оливин, рассчитывался путем добавления оливина в реконструированный захваченный расплав (обратная кристаллизация) в программе Petrolog 3. Рассчитывался состав

расплава, находящийся в равновесии с оливином $Fo_{90,4}$ (Коваленко и др., 2004), более магнезиальный, чем наиболее магнезиальный, представленный в этой работе состав оливина ($Fo_{90,1}$).

3.1.2. Особенности термометрических экспериментов с включениями кислых расплавов

Как будет показано в работе, вкрапленники плагиоклаза и кварца содержат включения кислых силикатных расплавов. В таких расплавах диффузия происходит гораздо медленнее, чем, например, в базальтовых расплавах, захваченных оливином. Высокая вязкость кислых расплавов сильно влияет на время протекания фазовых превращений внутри включения и требует проведения длительных термометрических экспериментов (Чупин, Косухин, 1982; Рейф, 1990).

Для достижения гомогенизации расплавных включений в кварце и плагиоклазе были использованы длительные выдержки при высокой температуре. Двухфазные расплавные включения (содержащие стекло и газовый пузырек) в плагиоклазе быстро нагревались до температуры начала размягчения стекла и выдерживались при этой температуре 60 минут. Если ни одно включение не достигало гомогенизации, то проводился ступенчатый нагрев на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 60-100 мин. на каждом этапе до полной гомогенизации групп или индивидуальных включений размером менее 10 мкм. Включения в кварце гомогенизировались так же, как и в плагиоклазе, с тем лишь отличием, что при температурах $500 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ вкрапленники выдерживались 30 минут с целью избежать разрушение образца при фазовом переходе $\alpha - \beta$ модификаций.

3.2. Минералого-геохимические методы исследований

3.2.1. Рентгено-спектральные методы

Рентгено-флуоресцентный анализ

Содержание главных петрогенных элементов в породах определялось методом рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) на рентгеновском спектрометре ARL 9900XP (ThermoFisher Scientific, USA) в центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований (ЦКП МИИ) в ИГМ СО РАН по методике (Карманова, Карманов, 2011). Точность определения петрогенных элементов представлены в Табл. 1.

Табл. 1. Диапазон определяемых соединений и ошибка определений методом РФА.

Компонент	Диапазон определяемых содержаний, мас. %	Относительное стандартное отклонение, %
Na ₂ O	0,04-15	28-3,5
MgO	0,05-45	30-1,7
Al ₂ O ₃	0,01-100	30-1,1
SiO ₂	0,01-100	30-0,7
P ₂ O ₅	0,01-2	21-4,3
K ₂ O	0,01-10	30-3,5
CaO	0,01-100	30-1,2
TiO ₂	0,01-100	27-0,8
MnO	0,01-2	24-3,4
Fe ₂ O ₃ (FeO total)	0,01-100	30-0,7
SO ₃	0,04-60	21-1

Рентгеноспектральный микроанализ

Методы рентгеноспектрального микроанализа позволяют определять элементный состав в микрообъеме (порядка 6-10 мкм³) вещества, что является необходимым при минералогических исследованиях. Измерение содержания главных компонентов в минералах и стеклах расплавных включений выполнялось методом энергодисперсионной спектрометрии (ЭДС) на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Ltd, Англия) с системой микроанализа INCA Energy 450+ (Oxford Instruments Ltd, Англия) в ЦКП МИИ ИГМ СО РАН.

Измерения состава минералов происходило при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе 1 нА, времени счета 60 секунд, размере области анализа – от 2 до 20 мкм, в зависимости от размера и гомогенности исследуемой фазы. При систематическом отклонении суммы анализов более чем на 1 отн. % от 100 мас. % в ходе измерения состава минералов со стабильной структурой и без 3-х валентных элементов, вводилась необходимая коррекция (Лаврентьев, Усова, 2018). Случайная погрешность при определении главных компонентов (концентрации > 10 мас. %) не превышает 0,9 отн. %, при определении второстепенных компонентов (1-10 мас. %) и примесей (0,3-1 мас. %) не превышает 3 и 13 отн. % соответственно (Лаврентьев и др., 2015). Измерение содержания главных компонентов природнозакаленных и экспериментально гомогенизированных стекол расплавных включений проводилось при указанных выше параметрах, с тем лишь отличием, что сканирование проводилось в режиме площадки с целью уменьшения эффекта потери натрия (Morgan, London, 2005).

Содержание главных и примесных компонентов в минералах и стеклах РВ измерялось методом волновой дисперсии на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA 8100 (Jeol Ltd, Япония) с 5 волновыми спектрометрами в ЦКП МИИ ИГМ СО РАН.

Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда от 20 до 100 нА в зависимости от исследуемого минерала и характера задачи, времени набора сигнала 60-120 секунд на пике и 30-60 секунд на измерение фона, размере зонда 2-5 мкм. Для мониторинга стабильности и дрефта прибора использовались внутренние стандарты, близкие по составу исследуемым образцам (Chromite USNM 117075, San-Carlos olivine, USNM 111312/444, VG-2 USNM 111240/52, Cr-augite (Jarosevich et al., 1980)). Эти стандарты измерялись через каждые 30-40 измерений и затем, при необходимости, вводилась коррекция. Пределы обнаружения при этих условиях (3 σ -критерий) представлены в Табл. 2.

Табл. 2. Пределы обнаружения метода ВДС для рутинного анализа (Лаврентьев и др., 2015).

Компонент	Предел обнаружения, мас. %
Na ₂ O	0,021
MgO	0,012
Al ₂ O ₃	0,015
SiO ₂	0,022
K ₂ O	0,012
CaO	0,014
TiO ₂	0,025
V ₂ O ₃	0,024
Cr ₂ O ₃	0,022
MnO	0,016
NiO	0,029
ZnO	0,036

Измерение состава оливина происходило согласно методике (Sobolev et al., 2007), при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда – 250 нА, времени набора сигнала 120 секунд на пике и 60 секунд на фоне, что позволило добиться пределов обнаружения 20-30 ppm (2σ) при определении примесных элементов (Ni, Ca, Mn, Ti, Al, Cr, Co) и 0,02 мол.% для форстеритовой составляющей в оливине.

Содержания S, Cl, Mn, P в стеклах расплавных включений измерялись при 100 нА. Для минимизации матричных эффектов (для корректного расчета поправочных коэффициентов) при использовании ZAF коррекции, главные элементы при измерении были заданы офлайн, в соответствии с данными, полученными методом ЭДС. Время измерения сигнала составляло 60 секунд, а пределы обнаружения при этих параметрах составили для Cl – 0,003 мас. %, S – 0,021 мас. % SO₃, P – 0,011 мас. % P₂O₅.

3.3.2. Методы масс-спектрометрии

Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой

Масс-спектрометрия обладает большей чувствительностью в сравнении с рентгеноспектральными методами и позволяет измерять с высокой точностью как примесные элементы (с содержанием в первые ppm и ppb), так и изотопные характеристики вещества в пробах. Валовые содержания примесных элементов в исследуемых породах измерялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS) на масс-спектрометре Element-2 (Finnigan Mat, Германия) с двойной фокусировкой в ЦКП МИИ ИГМ СО РАН.

Пробы приводились в аналитическую форму при сплавлении с метаборатом лития и растворении полученного сплава в разбавленной HNO₃. В качестве внутреннего стандарта использовались стандартный раствор иттрия (1-10 нг/мл). Для контроля дрефта прибора использовались стандарты JA-3, JB-3 (Geological Survey of Japan), GA и GH (CRPG, Франция), которые по составу соответствуют

природным базальтам, андезитами и гранитам. Пределы обнаружения (3σ) представлены в Табл. 3 (Николаева и др., 2008).

Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой с лазерным пробоотбором вещества

Измерение содержания примесных элементов в минералах-вкрапленниках проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с лазерным пробоотбором вещества на масс-спектрометре XSERIES II (ThermoFisher Scientific, USA) с приставкой лазерной абляции NewWave Research UP-213 в Новосибирском государственном университете. При расчетах измеренных концентраций использовались стандарты NIST 612 и KL 2 (Pearce et al., 1997; Jochum et al., 2000).

Табл. 3. Пределы обнаружения метода ИСП МС

Элемент	Предел обнаружения, ppm
Al	0,3
Ca	0,01
Fe	0,2
K	0,8
Mg	0,5
Mn	2
Na	0,02
P	4
Ti	10
Si	0,04
Ag	0,1
As	3
Au	0,1
Ba	5,5
Be	1
Cd	0,08
Co	0,1
Cr	3
Cu	5
Cs	0,1
Ga	1,2
Ge	1,5
Mo	1
Ni	3
Pb	1
Rb	0,5
Sb	0,1
Sc	0,1
Sn	0,3
Sr	3
Th	0,03
Tl	0,05
U	0,02
V	0,3
W	0,1
Y	0,1
Zn	5

Вторично-ионная масс-спектрометрия

Концентрация элементов примесей, воды, фтора и хлора в стеклах расплавных включений измерялась методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на одноканальном ионном зонде САМЕСА IMS-4F (Самеса, Франция) в Ярославском филиале Физико-технического института РАН, г. Ярославль.

Предварительно на поверхность препарата была нанесена пленка чистого золота толщиной 0,03 мкм. Ионизация пробы происходит при облучении образца высокоэнергетическим пучком первичных ионов $^{16}\text{O}_2^+$ при ускоряющем напряжении 15 кэВ и токе ионов 7 нА. Примесные элементы в диапазоне масс от ^7Li до ^{238}U и определялись в одном измерении, включающем 5 циклов накопления сигнала. Время накопления сигнала варьировалось в зависимости от интенсивности этого сигнала и определялось автоматически контролем статистики в процессе накопления, а максимальное время накопления для каждого из элементов в цикле не превышало 1 минуты. Точность определения концентраций микропримесей характеризовалась величиной 10 отн. % для концентраций $>1\text{ppm}$, и 20 отн. % в диапазоне концентраций 1-0,1 ppm.

Беспиролизная газовая хромато-масс-спектрометрия

Измерение состава газовой фазы включений минералообразующих сред во вкрапленниках выполнялось методом беспиролизной газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС). Это метод валового анализа газовой фазы, извлеченной из включений, обладающий крайне высокой чувствительностью и позволяющий определять наличие молекулярных соединений в широком диапазоне соотношений массы и заряда.

Вскрытие включений и извлечение газовой составляющей производилось ударным разрушением небольшого количества вкрапленников в специальном реакторе в токе гелия при температуре 130-160 °С. Такой способ извлечения позволил проанализировать состав газовых обособлений расплавных включений и

содержимого флюидных включений без принципиального изменения их состава в газовом тракте хроматографа. Для прецизионного определения содержания углеводородов и неорганических соединений в газовой фазе была использована методика ГХ-МС, изложенная в (Бульбак и др., 2020). Состав механически извлеченной газовой смеси анализировался на газовом хромато-масс-спектрометре Focus GC/DSQ II MS (ThermoScientific, USA) в лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН. Для интерпретации данных хромато-масс-спектрометрии применялось программное обеспечение AMDIS версии 2.73, а также NIST MS Search 2.4 (с использованием библиотек масс-спектров NIST 2020 и Wiley 12). Количество конкретного соединения определялось как отношение площади хроматографической линии этого соединения к сумме площадей всех зарегистрированных линий (отн. %). Это отношение можно рассматривать как меру молекулярной доли соединения в проанализированной газовой смеси.

3.3.3. Методы КР-спектроскопии

Качественное определение молекулярных соединений в газовой фазе флюидных включений и газовых обособлениях расплавных включений во вкрапленниках проводилось методом спектроскопии комбинационного рассеивания света (Рамановской спектроскопии). Анализ выполнялся на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 в ЦКП МИИ ИГМ СО РАН. Позиционирование лазерного луча на анализируемом включении производилось с помощью встроенного поляризационного микроскопа Olympus VX-41. В ходе работы использовался твердотельный Nd:YAG лазер с длиной волны 532 нм и выходной мощностью 75 мВт. Регистрация проводилась с помощью CCD детектора с рабочей температурой -70 °С, охлаждаемого по методу Пельтье. Анализ проводился в геометрии обратного рассеяния. Для сбора рассеянного света использовался объектив 100x с высокой числовой апертурой. Качественное

определение состава выполнялось при сравнении измеренного спектра и рамановского спектра чистых веществ.

Определение содержания воды в стеклах расплавных включений выполнено согласно методике из (Котов и др., 2021). Данная методика основана на отношении интенсивности и площади пиков в рамановских спектрах водосодержащих стеклах и была успешно применена при исследовании крупного кальдерного извержения пер. Ветровой (о. Итуруп) (Smirnov et al., 2019). Измерялись рамановские спектры выведенных на поверхность кислых стекол в диапазоне частот 100-1200 см⁻¹ и 2900-3800 см⁻¹. При обработке полученных спектров использовалось программное обеспечение Fityk 0.9.8 (Wojdyr, 2010).

Определение содержания воды в стеклах расплавных включений в кварце проводилось с использованием калибровки $C_{H_2O}=0.8848(A_w/A_s)$, где C_{H_2O} – получаемая оценка содержания воды, A_w – площадь водного пика в диапазоне 2900-3800 см⁻¹, а A_s – площадь группы трех силикатных пиков в диапазоне 850-1200 см⁻¹, после вычитания базовой линии. Использование этого подхода дает ошибку измерения 0,24 мас. %.

Одной из главных проблем при получении спектров стекол включений является проблема учета влияния минерала-хозяина на общий регистрируемый спектр. Высокочастотная часть измеряемого нами спектра силикатного стекла (850-1200 см⁻¹) осложняется характерной линией пироксена-хозяина вблизи 1010 см⁻¹. В случае включений в пироксенах использовалась как калибровка, описанная выше, так и калибровка на основе интенсивностей линий – $C_{H_2O}=11.637(I_{3550}/I_{485})$, где I_{3550} – интенсивность водного пика, I_{485} – интенсивность силикатного пика после вычитания базовой линии. Ошибка измерения 0,15 мас. %. В силу того, что силикатный пик в области 485 см⁻¹ перекрывается интенсивной линией кварца 465 см⁻¹, эта калибровка не применялась для анализа состава включений в кварце.

Методом рамановской спектроскопии проведены оценки содержания CO₂ в составе газовых обособлений расплавных включений в оливине из базальтов и

андезибазальтов вулкана Меньший Брат по методике, изложенной в (Миронов и др., 2020). Так же, как и в этой работе, нами оценивалась плотность углекислоты в газовом пузырьке включений на основании расстояния между двумя характеристическими пиками колебаний молекул CO_2 («диады Ферми», в области между ~ 1285 и $\sim 1388 \text{ см}^{-1}$) в Рамановском спектре.

Рассчитанные плотности углекислоты в газовых пузырьках позволили провести оценки содержаний CO_2 в захваченном расплаве используя подход согласно (Миронов и др., 2020). Для этого производилась оценка размеров и объемов расплавных включений. Для всех включений была принята форма трехосного эллипсоида (Moore et al., 2015; Aster et al., 2016), в котором длина и ширина измеряются в видимом сечении с помощью микролинейки, встроенной в окуляр поляризационного микроскопа. Оценка толщины проводилась также при прямом оптическом измерении расстояния от верхней до нижней границы включения с помощью микрометра, встроенного в фокусирующий винт микроскопа. Измеренные значения толщины домножались на коэффициент 1,68, который соответствует среднему показателю преломления оливина Fo_{80-90} (1,65—1,71) (Трегер, 1968). Форма газового пузырька была принята сферической, а размер сферы определялся как диаметр пузырька в видимом сечении. Объем стекла во включении вычислялся как разница между объемом включения (объем трехосного эллипсоида) и объемом газового пузырька (объем сферы).

Итоговые масс-балансовые расчеты проводились в соответствии с общепринятыми схемами (Hartley et al., 2014; Moore et al., 2015; Moore, Vodnar, 2019). Вычислялась масса CO_2 в пузырьке, масса стекла во включении (при плотности базальтового стекла $2,7 \text{ г/см}^3$ (Shishkina et al., 2010)), общая масса включения и массовая доля углекислоты. Так как концентрация CO_2 в стекле неизвестна, то полученные массовые проценты могут рассматриваться исключительно как минимальные оценки углекислоты в расплавном включении.

Глава 4. Основные породы вулкана Меньший Брат и их источники

4.1. Петрография и минеральный состав посткальдерных базальтов

Продукты основного вулканизма вулкана Меньший Брат представлены лавовыми потоками шлаковых конусов Коротышка и Восток. Образцы, слагающие лавовые потоки обоих кратеров сильно похожи по минеральному составу и структурно текстурным особенностям. Они представляют собой темно-серые порфировые базальты, с массивной, реже пористой текстурой. Более пористые структурные разности представлены в верхних частях потоков. Порфировая структура обусловлена наличием большого количества вкрапленников и гломеропорфировых сростков.

Порфировые вкрапленники представлены фенокристами плагиоклаза, клинопироксена, ортопироксена и оливина (Рис. 3). Многочисленные гломеропорфировые сростки представлены срастаниями фенокристов пироксенов и плагиоклаза, оливин не образует сростков с другими минералами, редко наблюдаются оливинные мономинеральные сростки.

Микроскопически фенокристы и гломеропорфировые сростки от образца к образцу занимают от 20 до 35 % объема породы. Минеральный состав вкрапленников: плагиоклаз (35-40 % всех вкрапленников), клинопироксен (20-25 %), ортопироксен (20-25 %), оливин (10-15 %). В составе основной массы породы присутствуют плагиоклаз, клинопироксен, оливин, магнетит. В интерстициях между микролитами основной массы присутствует интерстициальное стекло, что и обуславливает интерсертальную структуру основной массы.

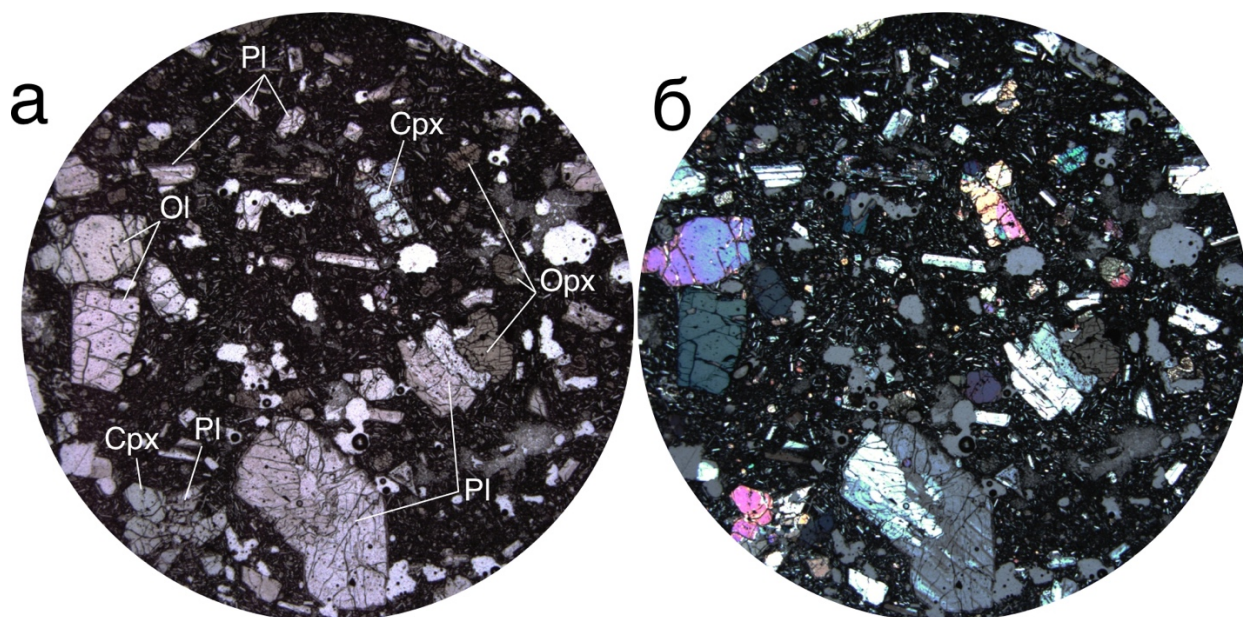


Рис. 3. Фотоснимки шлифа в проходящем свете образца базальта из современных лавовых потоков вулкана Меньший Брат: а – николи параллельны, б – скрещенные николи. Диаметр поля зрения – 2 мм.

Плагиоклаз – наиболее распространенный минерал данных пород, слагает идиоморфные прямоугольные кристаллы светло-серого цвета. Он образует вкрапленники размером от 0,25 до 2 мм (Рис. 4) и микролиты основной массы размером до 0,07 мм. Плагиоклаз повсеместно обладает полисинтетическим двойникованием, а также содержит большое количество кристаллических включений клино- и орто- пироксена.

Ca-Mg и Fe-Mg пироксены. Пироксены в изученных образцах образуют вкрапленники размером до 2 мм зеленого (СРх) и буровато-коричневого (ОРх) цвета, а также микролиты основной массы (Рис. 5). Довольно часто они образуют гломеропорфировые сростки с плагиоклазом. Многие вкрапленники пироксенов содержат апатит, магнетит и плагиоклаз в виде кристаллических включений размером до 0,05 мм.

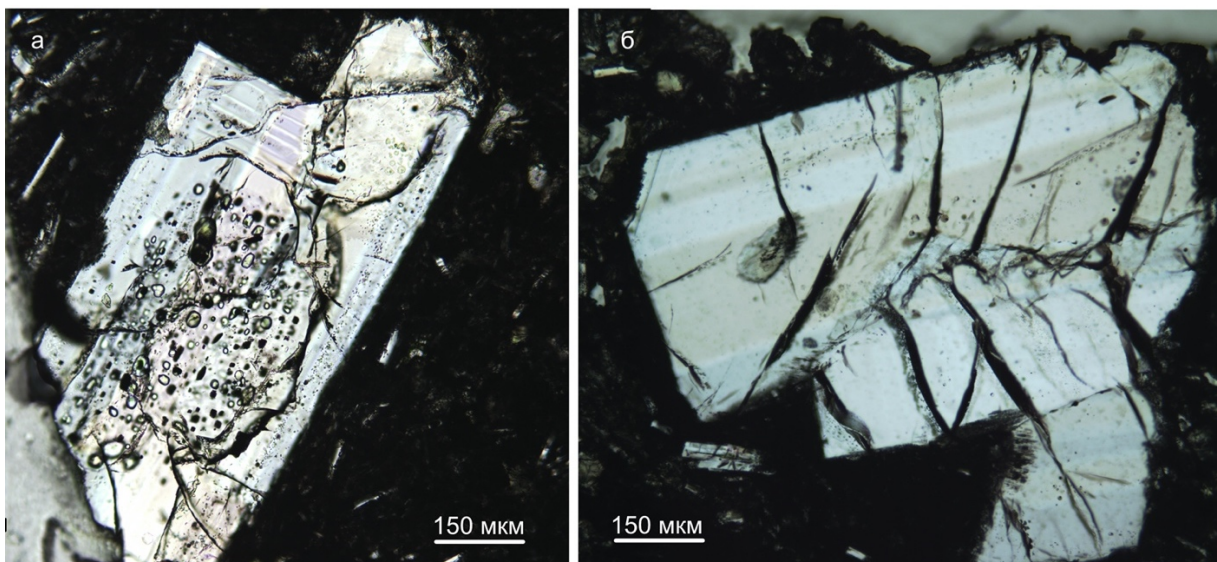


Рис. 4. Вкрапленники плагиоклаза из базальтов вулкана Меньший Брат в проходящем свете: а – в пластинке, б – в шлифе.

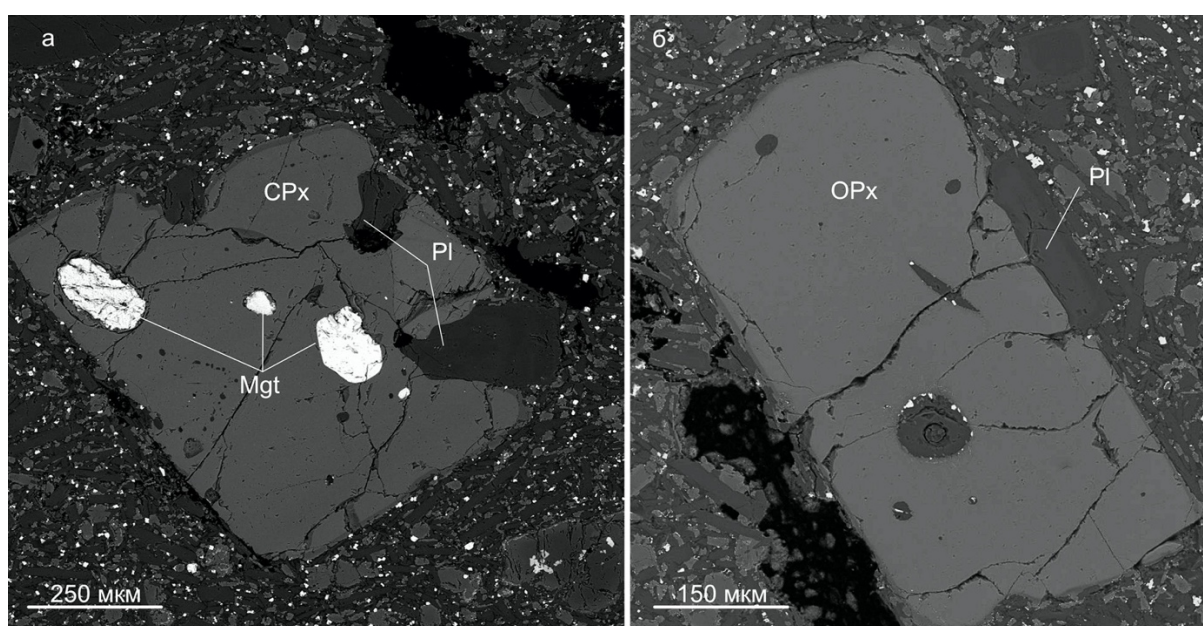


Рис. 5. BSE-изображения вкрапленников клинопироксена (а) и ортопироксена (б) в базальтах вулкана Меньший Брат.

Оливин представлен вкрапленниками размером до 1,5 мм с зеленоватой окраской. Он зачастую образует изометричные зерна, реже встречаются кристаллы с элементами скелетного роста. Нередко края оливина резорбированы и окружены

симплектитовой каймой, состоящей из клинопироксена и магнетита (Рис. 6). Оливин содержит многочисленные кристаллические включения хорошо ограниченной бурой шпинели (Рис. 7). Такие кристаллы шпинели встречаются только как включения в оливине и полностью отсутствуют как в основной массе породы, так и в остальных минералах-вкрапленниках.

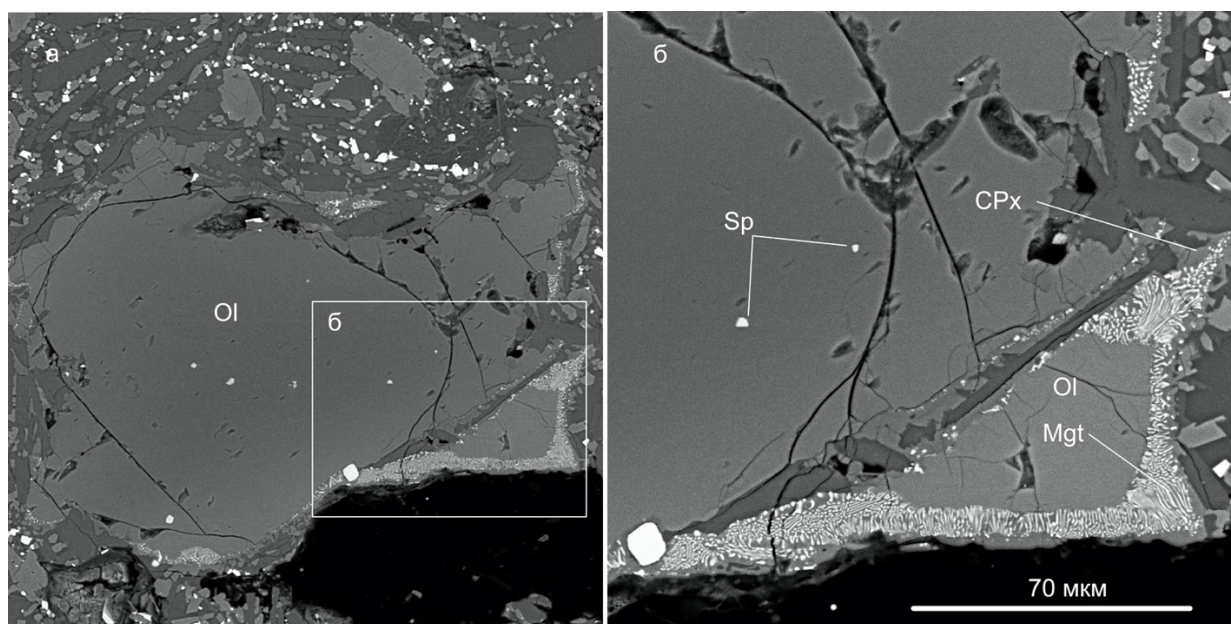


Рис. 6. BSE-изображение резорбированного вкрапленника оливина из базальтов вулкана Меньший Брат: а – общий вид, б – симплектитовая клинопироксен-магнетитовая кайма.

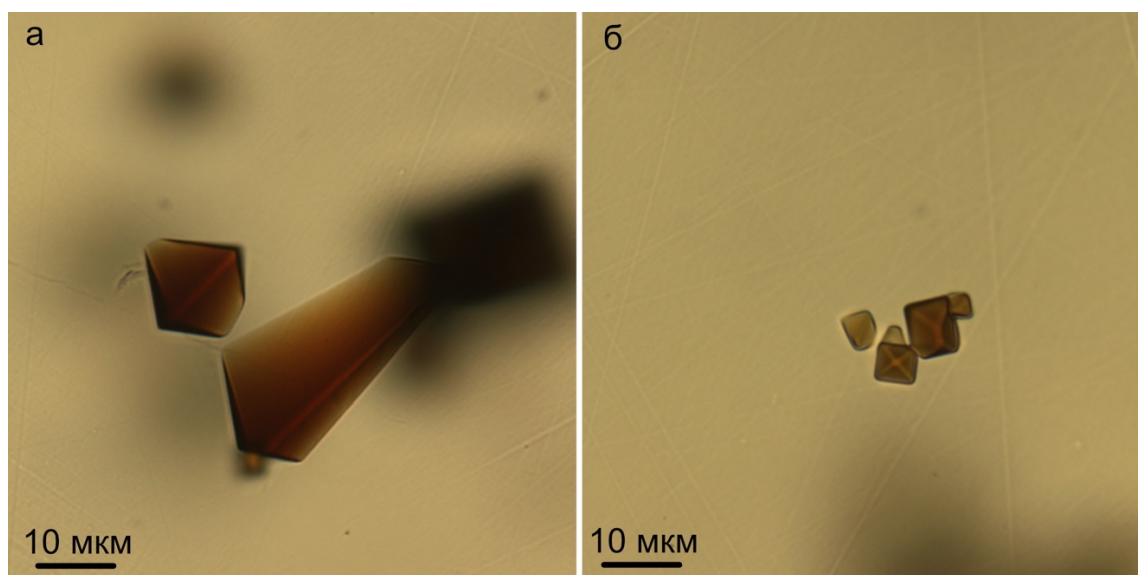


Рис. 7. Включения бурой хорошо ограненной хромистой шпинели во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана Меньший Брат.

Содержание форстерита во вкрапленниках находится в пределах 85,1-90,1 мол. %. Для оливина характерна прямая химическая зональность, выражающаяся в понижении содержания форстеритового минала от центра к периферии. Но в некоторых краевых частях зерен происходит резкое увеличение содержания форстерита до 91 мол. % (Рис. 8). Здесь же зачастую присутствуют ламели магнетита и ортопироксена, возникшие в результате позднего низкотемпературного окисления оливина (Blondes et al., 2012; Del Moro et al., 2013; Плечов, 2014). Подобные составы оливинов не использовались нами при интерпретации результатов.

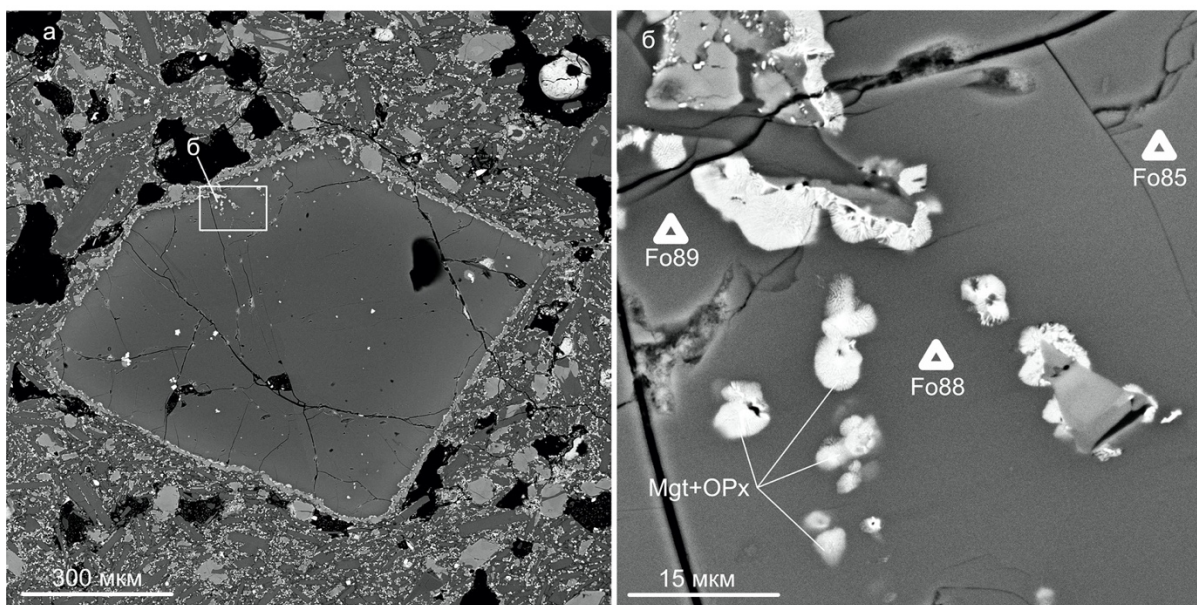


Рис. 8. BSE-изображение вкрапленника оливина (а) из базальтов вулкана Меньший Брат с зонами вторичного повышения магнизиальности в краевой части зерна (б).

Акцессорные минералы. Магнетит и титаномагнетит встречены в составе основной массы базальтов и в качестве минеральных включений в плагиоклазе и в пироксенах.

Обнаруженный единичный вкрапленник кварца имеет сильно оплавленные края и окружен каймой из мелких кристаллов ортопироксена. Присутствие кварца в этих высокомагнезиальных базальтах может быть связано с контаминацией расплава коровыми породами.

4.3. Химический состав основных пород

Химический состав голоценовых лав вулкана Меньший Брат представлен в Табл. 5S (Приложение) (Рис. 9).

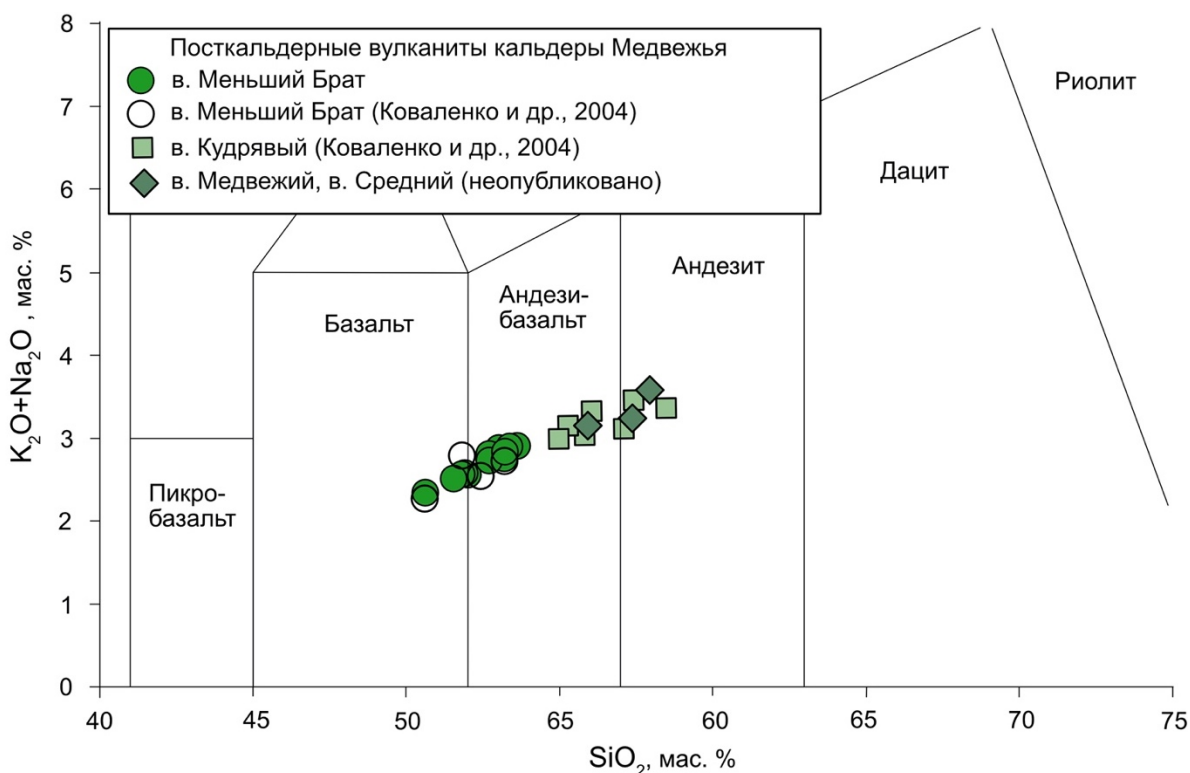


Рис. 9. ТАС диаграмма с валовыми составами пород вулкана Меньший Брат и других вулканов кальдеры Медвежья.

По соотношению FeO_{tot}/MgO (Miyashiro, 1974) породы попадают в поле известково-щелочной серии (Рис. 10а). Слабая отрицательная корреляция между содержанием железа и кремния согласуется с этим (Рис. 10б). При этом наблюдается отчетливая положительная корреляция между содержанием TiO_2 и железистостью пород (Рис. 11а), что характерно для пород толеитовой серии. Содержание Al_2O_3 , не превышающее 16,5 мас. %, располагает эти породы в области низкоглиноземистых базальтов (Kuno, 1960; Магматические ..., 1983) (Рис. 11б). По соотношению CaO и щелочей (Peacock, 1931; Macdonald et al., 2000; Gill, 1981) голоценовые продукты извержений вулкана Меньший Брат следует отнести к низкокалиевым, низкокальциевым и щелочноизвестковым (Рис. 11 в, г). По мере увеличения содержания кремния, в базальтах уменьшается содержание магния и кальция, при этом растет содержание щелочей и титана, (Табл. 5S (Приложение), Рис. 11). Породы конуса Коротышка в большинстве своем характеризуются наиболее основными составами с меньшим количеством SiO_2 , FeO и TiO_2 и более

высоким MgO (Рис. 10, Рис. 11). Лавы и пирокластика конуса Восток отличаются от Коротышки более кислыми составами и относятся к андезибазальтам.

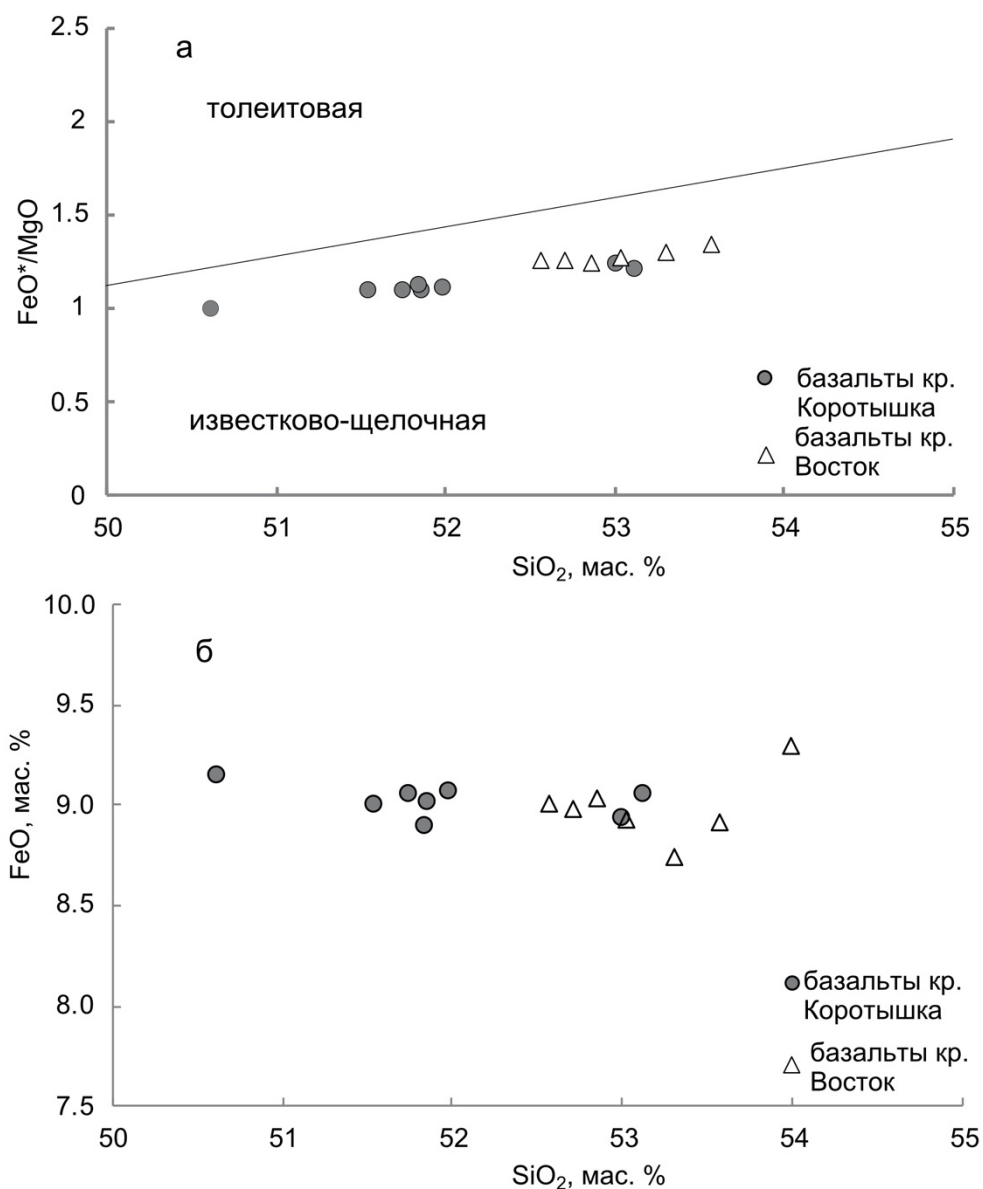


Рис. 10. Составы лавовых потоков вулкана Меньший Брат на диаграмме Мияширо (Miyashiro, 1974) (а) и FeO-SiO₂ (б).

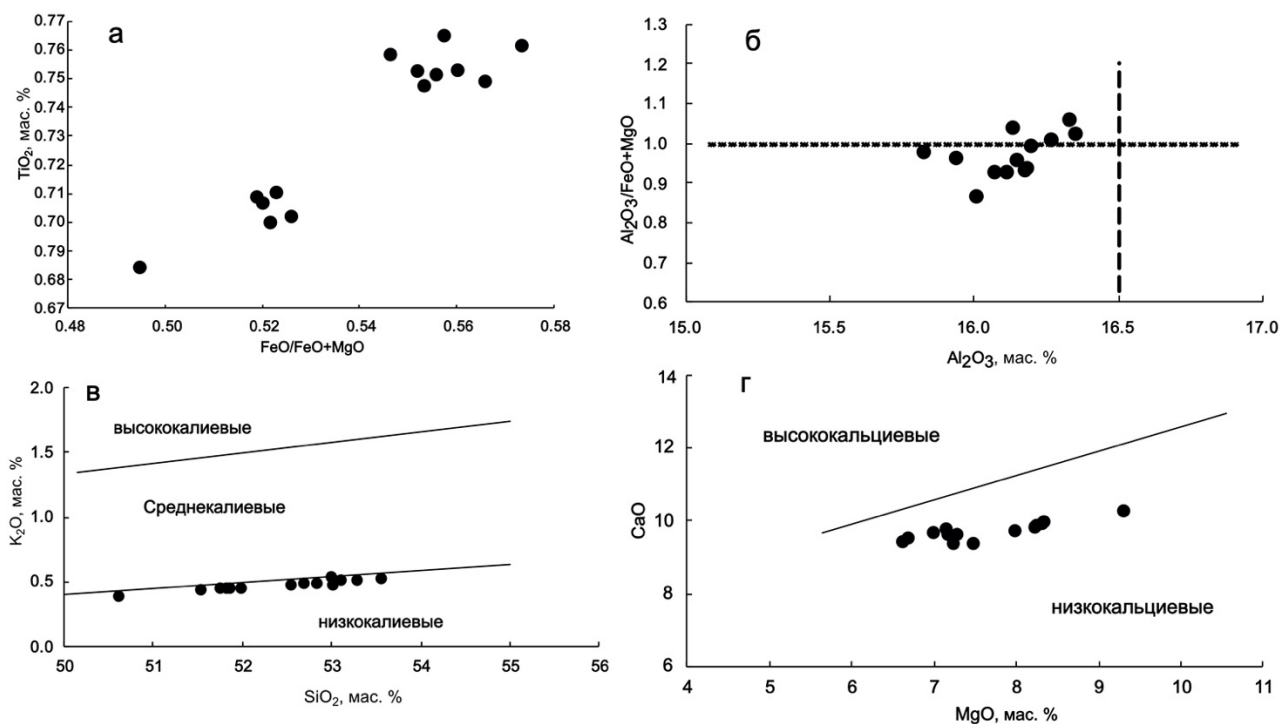


Рис. 11. Петрохимические особенности посткальдерных лавовых потоков вулкана Меньший Брат: б – глиноземистость по (Kuno, 1960); в – калиевость пород по (Петрографический кодекс, 2009); г – кальциевость по (Macdonald et al., 2000).

Продукты извержения вулкана Меньший Брат обогащены, по сравнению с составом примитивной мантии (Hofmann, 1988), крупноионными литофильными элементами (Ba, Pb, U) и Sr относительно РЗЭ и высоkozарядных элементов (Nb, Zr, Ti) (Рис. 11а, Табл. 5S (Приложение)). Нормализованное по хондриту (Sun, McDonough, 1989) распределение РЗЭ характеризуется горизонтальными спектрами (Рис. 12б), ($La_N/Yb_N = 0,94-1,22$, $La_N/Sm_N = 0,87-1,1$, Табл. 5S (Приложение)). Отношения тяжелых РЗЭ ($Dy_N/Yb_N = 0,97-1,15$) близко к 1 в пределах аналитической погрешности.

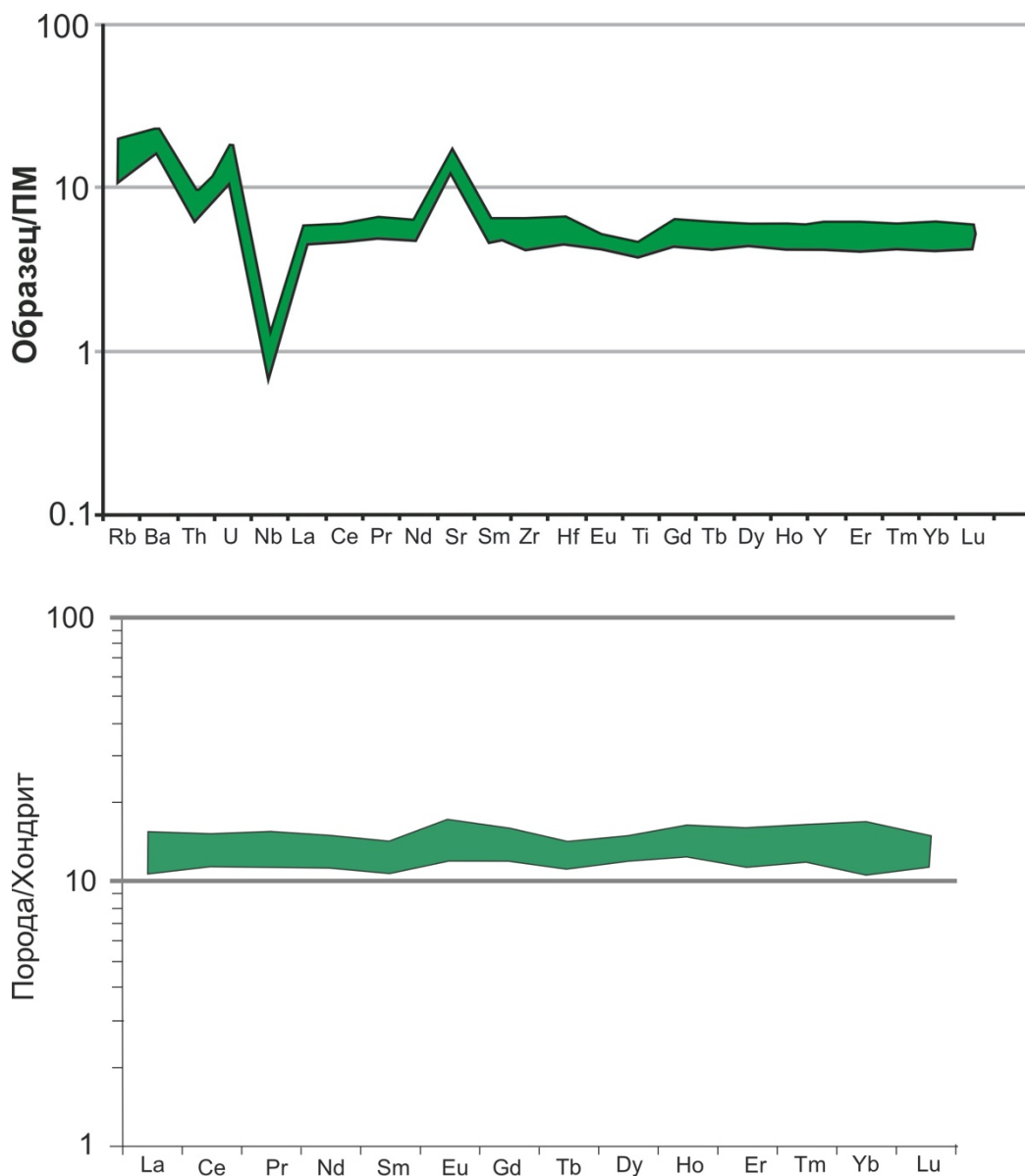


Рис. 12. Распределение редких (вверху) и редкоземельных (внизу) элементов в лавовых потоках вулкана Меньший Брат. Состав хондрита и примитивной мантии по (McDonough, Sun, 1995).

4.3. Ликвидусная ассоциация базальтов

На основании взаимоотношения минералов-вкрапленников, отсутствии включений оливина в плагиоклазе, пироксенах, и отсутствии пироксенов и плагиоклаза в виде включений в оливине можно заключить, что ликвидусная ассоциация минералов-вкрапленников из базальтов вулкана Меньший Брат представлена оливином и шпинелью. Об этом же говорят высокая магнизиальность

оливина (Fo до 90,1 мол. %) и хромистый состав шпинели в нем. Составы включений шпинели во вкрапленниках оливина, а также самих вкрапленников оливина из тефр и базальтов приведены в Табл. 6S (Приложение), Табл. 7S (Приложение).

Содержание форстерита во вкрапленниках оливина находится в пределах 85-90 мол. %. Для оливина характерна прямая химическая зональность, выражающаяся в понижении содержания форстеритового минала от центра к периферии. Содержание кальция в оливине растет по мере роста железистости от центра к периферии от 0,14 до 0,20 мас. % (Табл. 6S (Приложение), Табл. 7S (Приложение), Рис. 13). Содержание алюминия, наоборот, снижается при увеличении железистости (Рис. 13), что обусловлено одновременной кристаллизацией оливина со шпинелью. Рост содержания кальция в оливине по мере кристаллизации свидетельствует о том, что он образовался до массовой кристаллизации плагиоклаза и авгита.

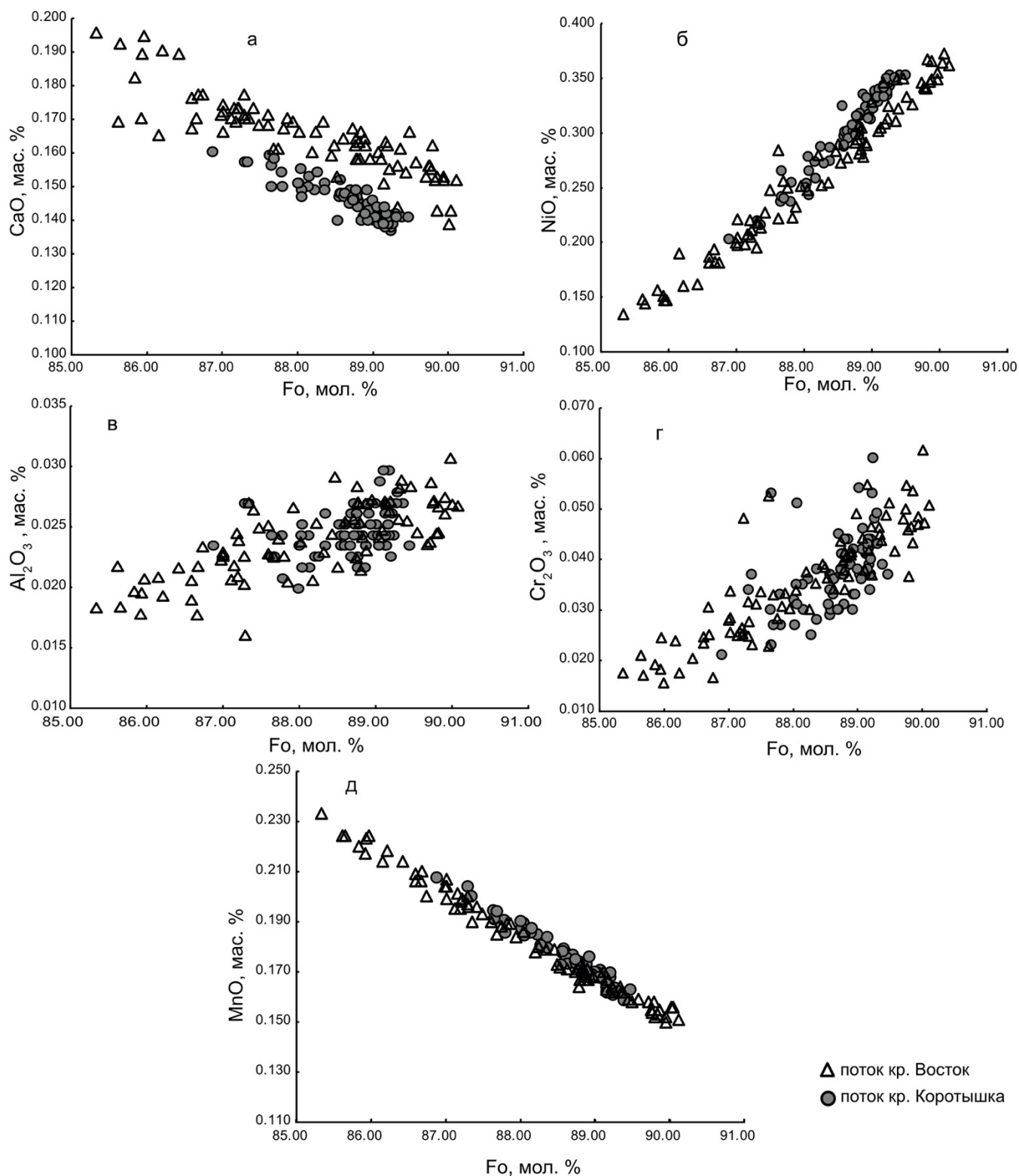


Рис. 13. Содержания Ca, Al, Ni, Cr и Mn во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана Меньший Брат.

Шпинель представлена идиоморфными, хорошо ограненными кристаллами октаэдрического габитуса коричневого цвета (Рис. 7), включенными в оливин, и в некоторых случаях присутствует как ксеногенная фаза в расплавных включениях в оливине. Представительные составы включений шпинели во вкрапленниках оливина из тефр и базальтов обоих кратеров приведены в Табл. 7S (Приложение). Они демонстрируют небольшие вариации $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ (Mg#) в диапазоне от 0,37 до 0,66 и $Cr/(Cr+Al)$ (Cr#) от 0,46 до 0,58 (Табл. 7S (Приложение), Рис. 14). Содержания TiO_2 находятся в диапазоне 0,31-0,66 мас. % и имеют хорошую обратную корреляцию с магнезиальностью и хромистостью (Рис. 14). Определенное по балансу зарядов отношение FeO/Fe_2O_3 находится в диапазоне 1,16-2,3.

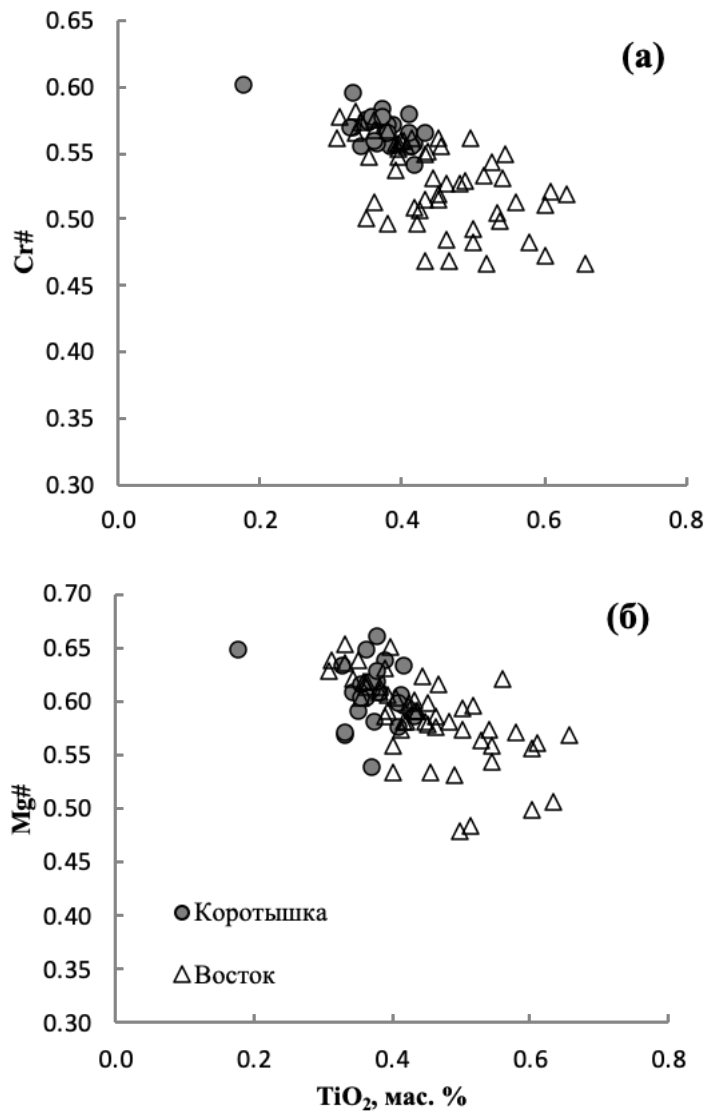


Рис. 14. Составы включений хромистой шпинели в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат.

Используя приведенные выше составы и модель (Ballhaus et al., 1991), определена фугитивность кислорода для равновесия оливин-шпинель. Она находится в диапазоне $NNO-0,9$ - $NNO+1$ при температурах $1030 - 1300$ °C и, в среднем, соответствует буферу $NNO+0,3$ (Рис. 15).

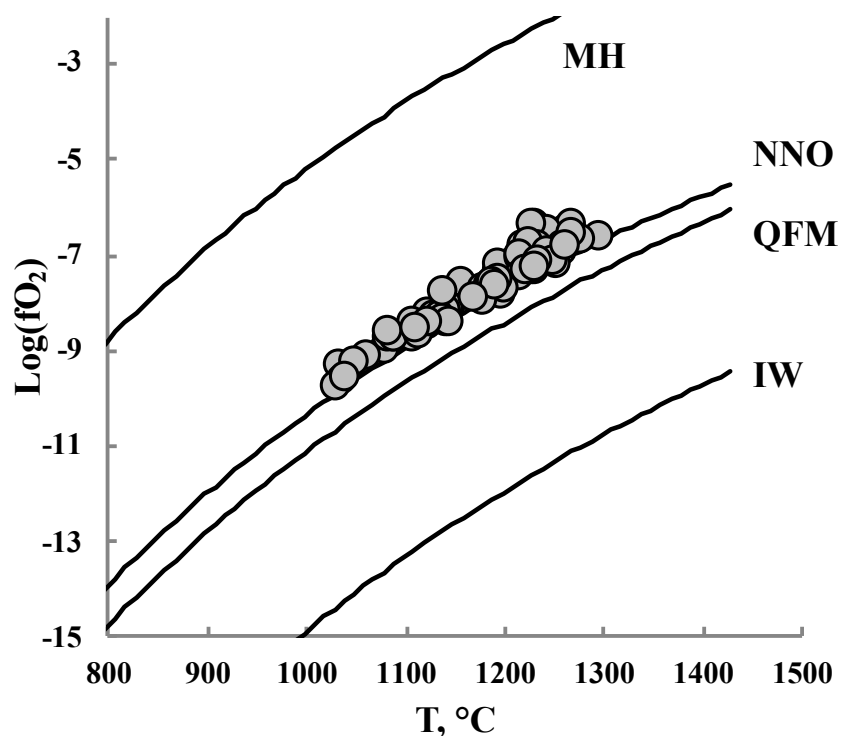


Рис. 15. Фугитивность кислорода базальтового расплава, рассчитанная на основе равновесных оливина и шпинели из базальтов вулкана Меньший Брат. Кислородные буферы: NNO - никель-оксид никеля; QFM – кварц-фаялит-магнетит; IW – железо-вюстит; MH – магнетит-гематит.

Включения шпинели группируются на диаграмме предложенной в (Kamenetsky et al., 2001) в области составов, типичных для шпинелидов из базальтов срединно-океанических хребтов, и частично попадают в поле наиболее титанистых шпинелей из перидотитов зон субдукции и перидотитов COX (Рис. 16). В целом, составы изученных шпинелей согласуются с составами шпинелей из вулканитов Камчатки (Nekrylov et al., 2019).

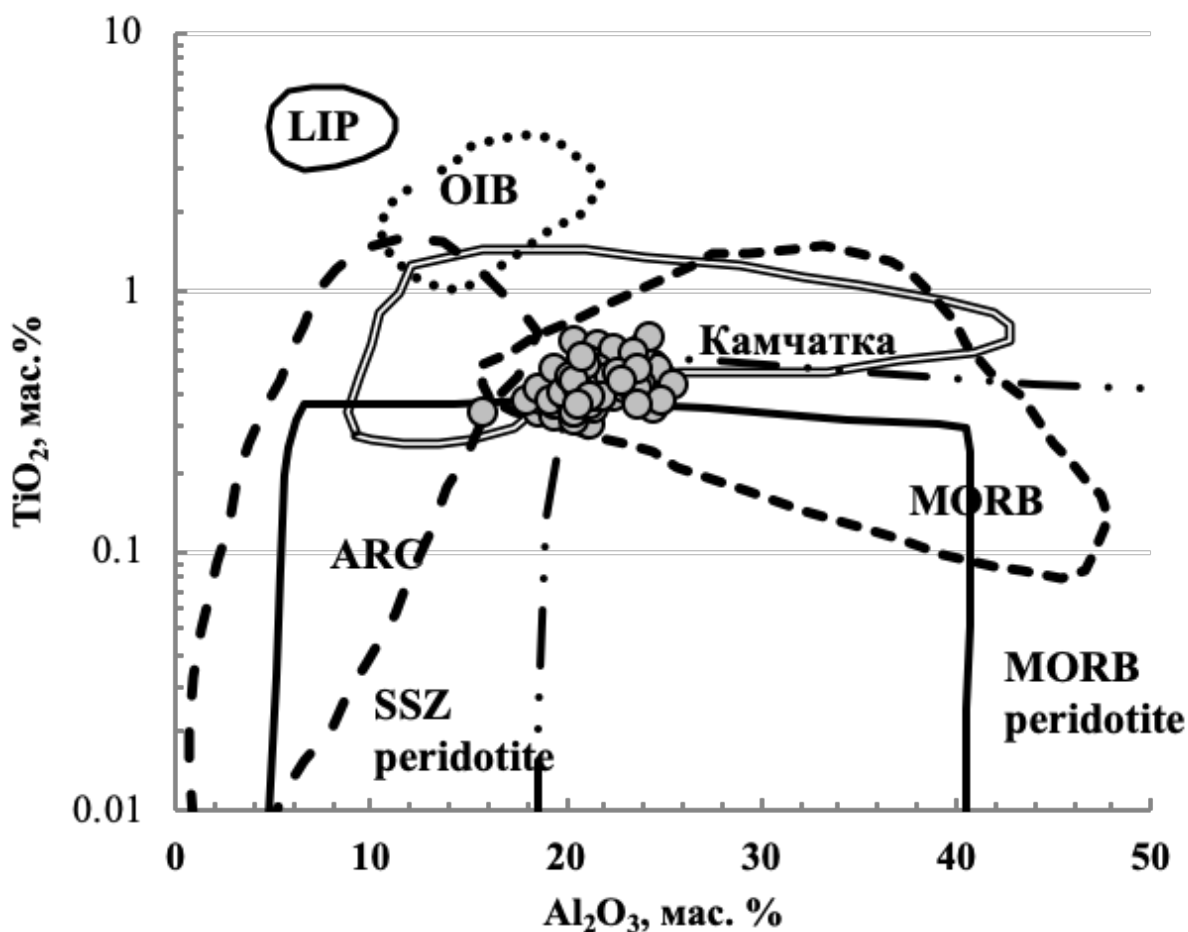


Рис. 16. Классификация составов шпинели по геодинамической обстановке по содержанию TiO_2 и Al_2O_3 в хромистой шпинели (по Kamenetsky et al., 2001). LIP – крупные изверженные провинции; OIB – базальты океанических островов; MORB – базальты срединно-океанических хребтов; ARC – вулканиты островных дуг; SSZ peridotites – надсубдукционные перидотиты; MORB peridotites – перидотиты COX. Поле составов шпинелей Камчатки по (Nekrilov et al., 2019).

Увеличение содержания Ca в оливине по мере уменьшения магнезиальности однозначно показывает, что кристаллизации плагиоклаза совместно с оливином не происходило. Закономерное уменьшение содержаний Al и Cr контролируется совместной с оливином кристаллизацией шпинели (Табл. 6S, 7S (Приложение)) (Рис. 13, Рис. 14). На основании чего можно с уверенностью заключить, что ликвидусной ассоциацией при кристаллизации базальтов была оливин и шпинель, и именно эти 2 минерала несут в себе информацию об исходных расплавах, из которых образовались базальты вулкана Меньший Брат.

4.3.1. Включения минералообразующих сред во вкрапленниках оливина

Во вкрапленниках оливина были обнаружены первичные расплавные включения. Среди них выделяется несколько типов: расплавные включения, флюидные включения, а также включения гетерогенного захвата. Расплавные включения являются наиболее распространенными типами включений и встречаются во вкрапленниках повсеместно, в то время как флюидные включения в рассмотренных образцах единичны. Находки включений гетерогенного захвата, хоть и не редки, но малоинформативны в силу своей аномальной природы и не используются в данной работе.

Расплавные включения в оливине встречаются в виде одиночных включений либо в виде азональных групп включения (Рис. 17). Обычно РВ в оливине имеют округлую, вытянутую форму. Габитуса, отвечающего негативной огранке минерала хозяина, не обнаружено. Размер включений варьирует в пределах от 5 до 100 мкм, при этом средний размер не превышает 30 мкм. Подавляющее большинство расплавных включений в оливине представлено многофазными включениями, содержащими стекло, кристаллические фазы и газовый пузырек. Гораздо реже встречаются двухфазные расплавные включения, имеющие только стекло и газовый пузырек, и равномерно девитрифицированные включения с четко видимым газовым пузырьком. Такие природнозакаленные расплавные включения, не подверженные процессам постзахватного изменения могут быть эффективно использованы для определения химического состава захваченного расплава без проведения термических экспериментов с закалкой. Наиболее подходящими для исследований в таком случае являются включения в оливинах из бомб и тефры, в которых происходила достаточно быстрая закалка извергнутого материала.

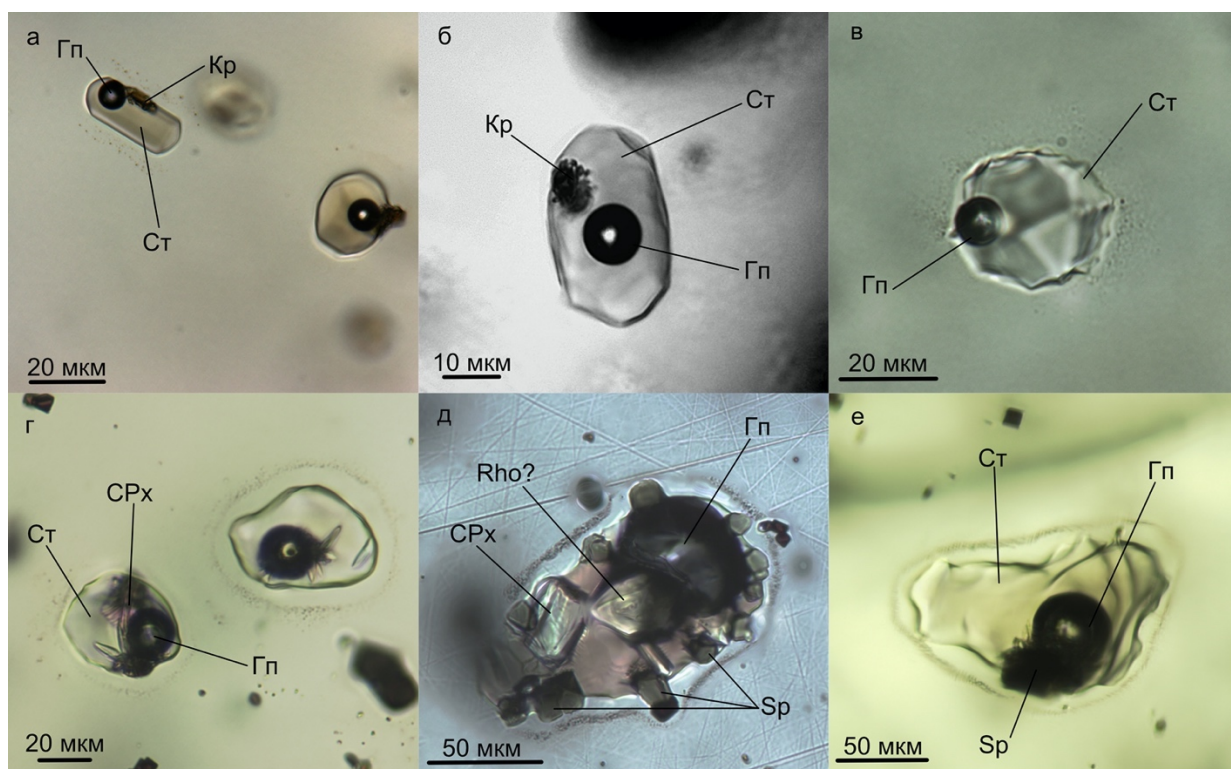


Рис. 17. Расплавные включения во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана Меньший Брат: а – группа стекловатых РВ; б – единичное РВ; в – природно-закаленное стекловатое РВ; г, д – частично-раскристаллизованные РВ; е – включение гетерогенного захвата с кристаллом хромистой шпинели.

4.3.2. Высокоглиноземистая ассоциация дочерних минералов в расплавных включениях

В образцах МД-6 и МД-18 в первичных раскристаллизованных расплавных включениях в оливине были обнаружены хорошо ограненные кристаллические фазы, представленные высокоглиноземистым клинопироксеном, зеленой глиноземистой шпинелью и бурой высокохромистой шпинелью, а также минералом группы рёнита (Рис. 17д, Рис. 18). Высокоглиноземистый клинопироксен и высокоглиноземистая шпинель совместно с минералами супергруппы рёнита в одной ассоциации встречаются только в расплавных включениях. В качестве минеральных включений в оливине и в основной массе изученных базальтов эти минералы не обнаружены. Эти минералы являются

дочерними фазами, кристаллизующимися во включении в процессе медленного остывания.

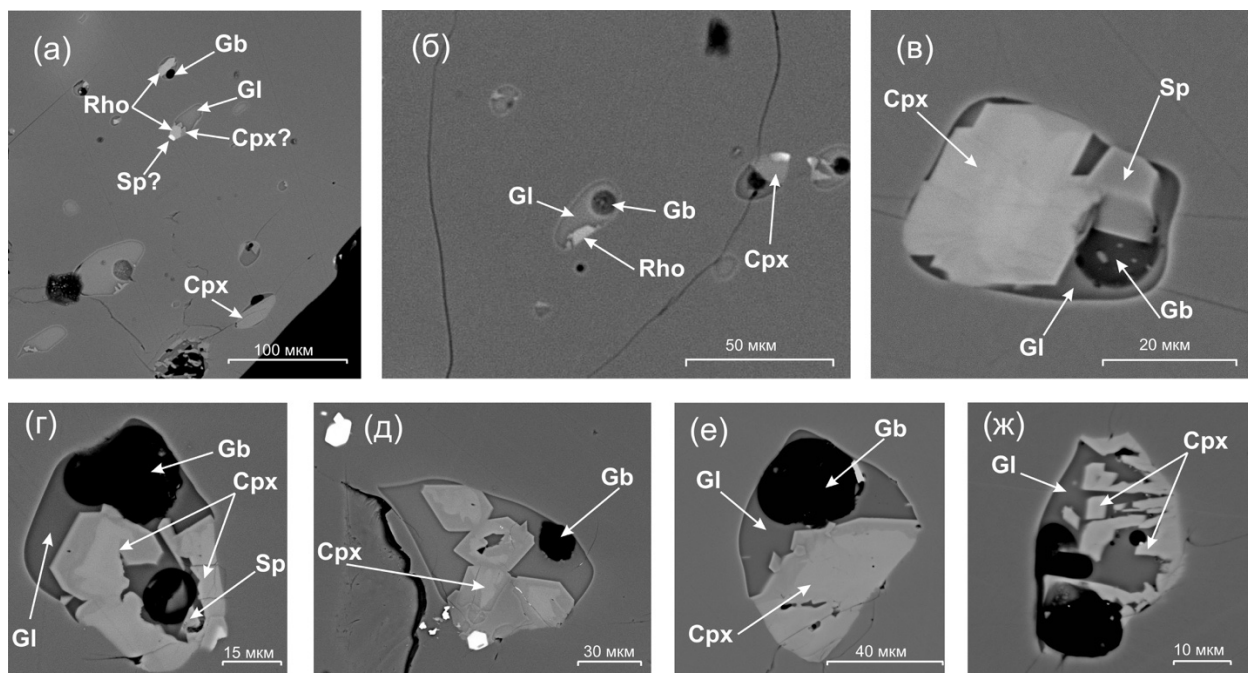


Рис. 18. BSE-изображения частично раскристаллизованных расплавных включений в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат. Принятые сокращения: Rho - рёнит, Crx - клинопироксен, Sp – шпинель, Gl – остаточное стекло, Gb – газовый пузырек.

Рёнит из расплавных включений в оливине базальтов вулкана Меньший Брат по содержанию железа и магния наиболее близок по составу к идеальному рёниту (Табл. 8S (Приложение)). Наблюдаемые небольшие вариации состава этой фазы позволяют составить следующую усредненную кристаллохимическую формулу, рассчитанную по трем анализам – $(\text{Ca}_{3,47}\text{Mg}_{0,31}\text{Na}_{0,22})(\text{Mg}_{4,78}\text{Fe}^{3+}_{3,41}\text{Fe}^{2+}_{2,30}\text{Al}_{0,99}\text{Ti}_{0,53}\text{Mn}_{0,01})\text{O}_4[\text{Si}_{6,78}\text{Al}_{5,22}\text{O}_{36}]$.

Отличительной чертой для минералов рёнит-куратитовой серии от других из супергруппы сапфирина является высокое содержание трехвалентных катионов, занимающих позиции двухвалентных катионов и титана ($\text{Al} + \text{Fe}^{3+} > 4$ ф.е. на 40 атомов кислорода (Табл. 8S (Приложение))).

Состав найденного нами рёнита отличается от идеального (Grew et. al., 2008) более низкими содержаниями Ti, Mg, высоким содержанием трехвалентных катионов, занимающих позиции двухвалентных катионов и титана ($Al+Fe^{3+} > 4$ ф.е. на 40 атомов кислорода (Табл. 8S (Приложение))), и более высокими содержаниями Fe (Табл. 8S (Приложение)). Исследованный минерал по составу наиболее близок к ряду рёнит – куратит (Hwang et al., 2016). Особенностью данного минерала является преобладание Si над Al в четверной координации и величина X_{Mg} 0,45-0,72. Однако низкие содержания Ti в нем (<1 ф.е. на 40 атомов кислорода (Рис. 19) позволяют называть этот минерал низкотитанистым Fe^{2+} аналогом рёнита.

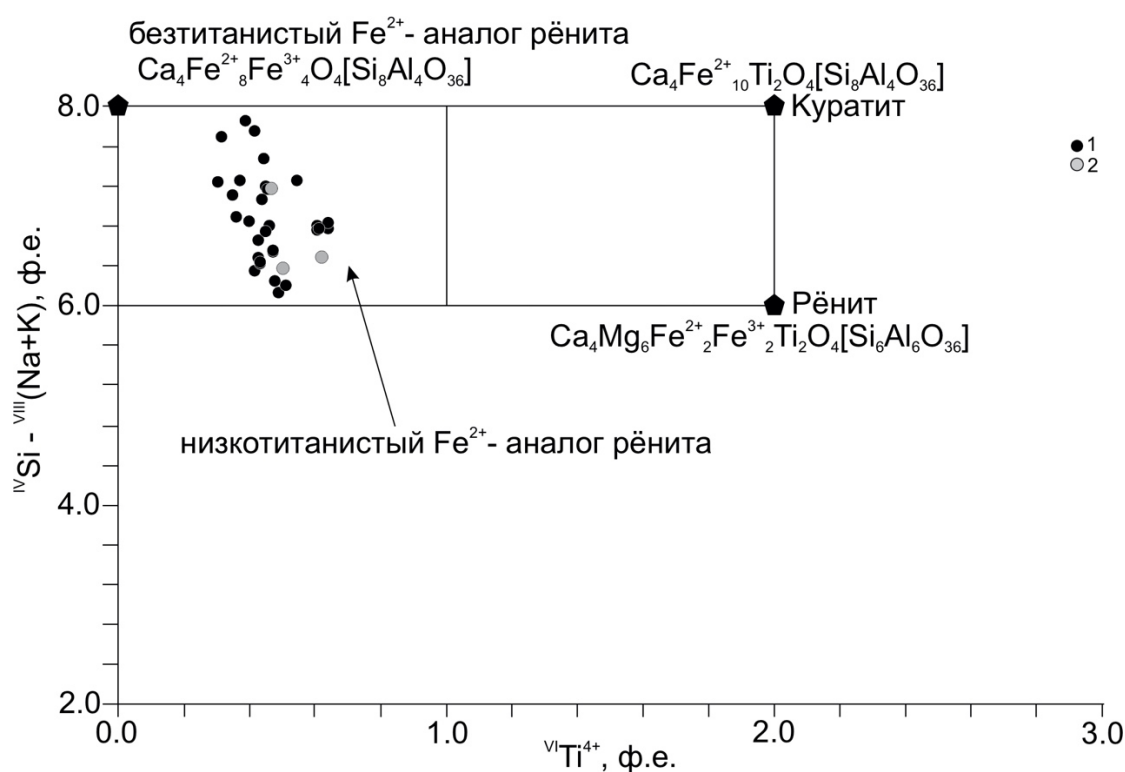


Рис. 19. Соотношение $(IV)Si-(VIII)(Na+K) - (VI)Ti^{4+}$ (на 28 катионов и 40 атомов кислорода) в обнаруженных минералах рёнит-куратитовой серии. Условные обозначения: 1 – рёнит из расплавных включений в оливине из сферолитов влк. Кудрявый (Шевко и др., 2016); 2 – рёнит из расплавных включений во вкрапленниках оливина из базальтов влк. Меньший Брат.

Рамановские спектры исследованных разновидностей дочернего минерала подгруппы рёнита в расплавных включениях во вкрапленниках оливина из

базальтов вулкана Меньший Брат представлены на (Рис. 20а). Для сравнения показаны спектры минералов рёнит-куратитовой серии в паралавах Нилгинского пирометаморфического комплекса, Монголия (Peretyazhko et al., 2017). В целом, положение и интенсивности пиков на полученных нами спектрах (391-395 см^{-1} , 545-548 см^{-1} , 702 см^{-1} , 839-855 см^{-1}) похожи на таковые в спектре минерала рёнит-куратитовой образца паралавы MN-1129 (Рис. 20б), для которого отмечено крайне низкое содержание титана (< 1 ф.е. Ti на 40 атомов кислорода). Небольшие пики в областях 655-658 см^{-1} , вероятно, соответствуют шпинели, а в области 823 см^{-1} – оливину-хозяину.

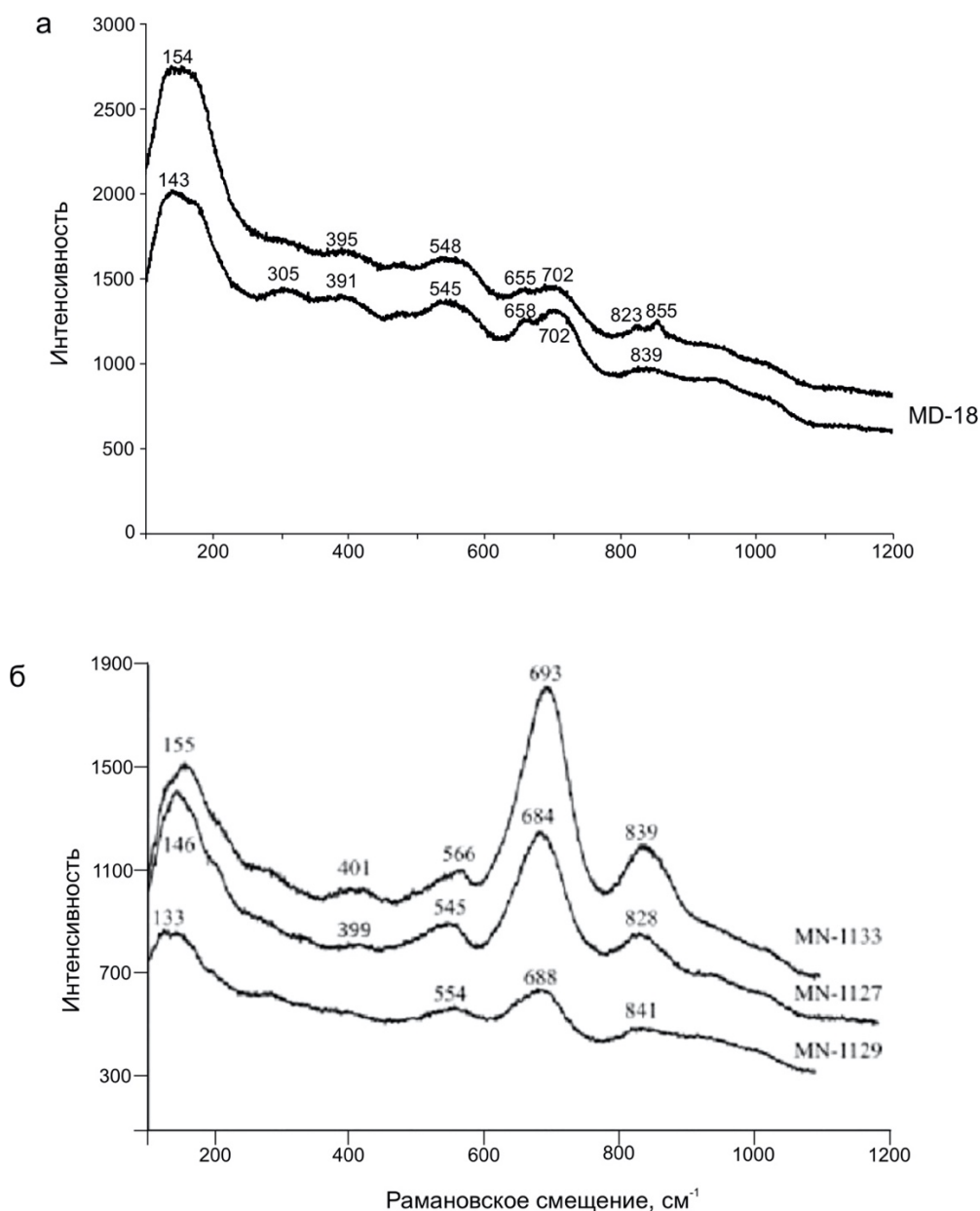


Рис. 20. Рамановские спектры минералов рёнит-куртитовой серии: а – в расплавных включениях в оливине кальдеры Медвежья; б – в паралавах Нилгинского комплекса (Peretyazhko et al., 2017).

Составы дочерних минералов *группы шпинели* в расплавных включениях во вкрапленниках оливина вулкана Меньший Брат по соотношению двух- и трёхвалентных катионов расположены вблизи границы между шпинелью и плеонастом и попадают в оба эти поля (Рис. 21).

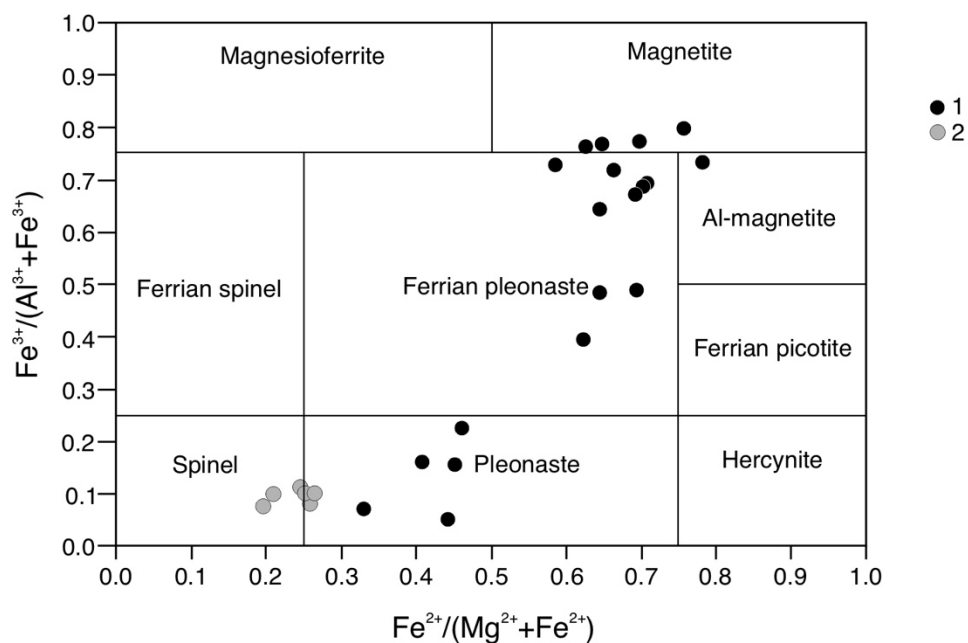


Рис. 21. Соотношение двухвалентных и трёхвалентных катионов в дочерних минералах группы шпинели. Границы полей по (Deer et al., 1992; Haggerty, 1991). Условные обозначения: 1 – шпинели из расплавных включений в оливине из сферолитов вулкана Кудрявый (Шевко и др., 2016); 2 – шпинели из расплавных включений во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана Меньший Брат.

Дочерний *клинопироксен* имеет большие вариации состава. Он встречается во включениях гораздо чаще рёнита и образует более крупные кристаллы. Клинопироксен в расплавных включениях в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат обладает концентрической зональностью, которая характеризуется значительным повышением содержания MgO от 9 до 14 мас. % от центра к краю кристаллов. С ростом содержания магния во внешних зонах происходит снижение содержания Al_2O_3 , FeO, CaO, TiO_2 (Табл. 8S (Приложение), Рис. 22).

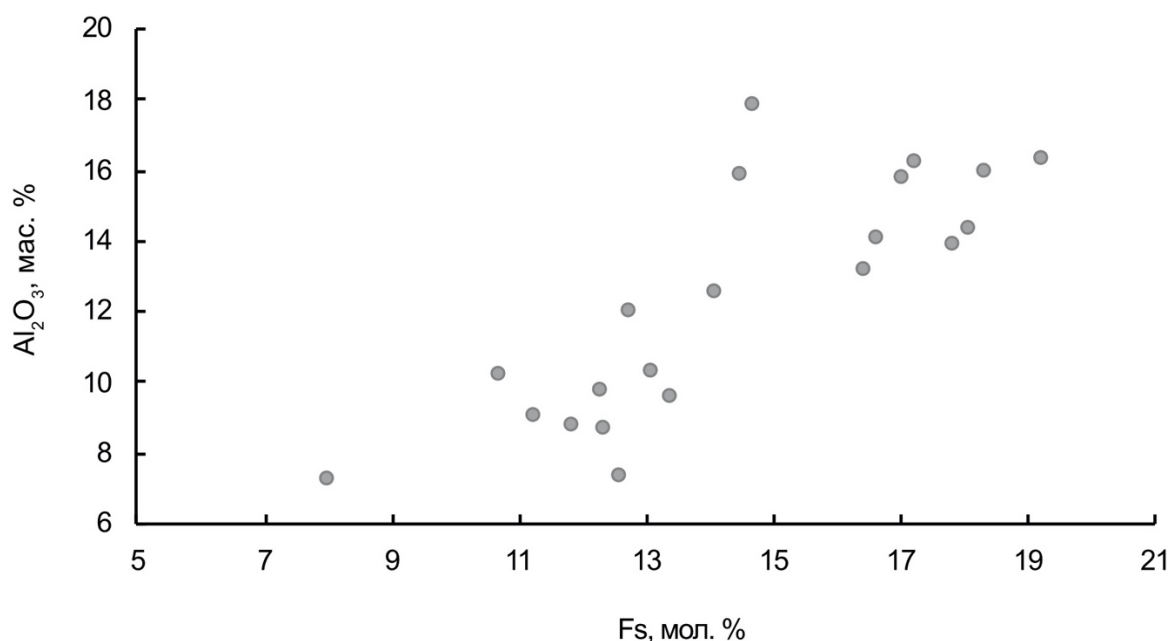


Рис. 22. Содержания алюминия в дочернем клинопироксене во включениях во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана Меньший Брат.

Эта ассоциация дочерних минералов является экзотической для магнезиальных базальтов. Рёнит-содержащие парагенезисы наиболее характерны для пород повышенной щелочности. Рёнит - цепочечный силикат из супергруппы сапфирина, в подгруппу которого входит собственно рёнит ($\text{Ca}_4(\text{Mg}_8\text{Fe}_2^{3+}\text{Ti}_2)\text{O}_4[\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{36}]$), куратит ($\text{Ca}_4(\text{Fe}_{10}^{2+}\text{Ti}_2)\text{O}_4[\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{36}]$), доррит ($\text{Ca}_4(\text{Mg}_3\text{Fe}_9^{3+})\text{O}_4[\text{Si}_3\text{Al}_8\text{Fe}^{3+}\text{O}_{36}]$) и ряд других минералов.

Впервые рёнит был описан в щелочных базальтах массива Рён, Германия [Soellner, 1907]. Позднее минералы супергруппы сапфирина были обнаружены в виде самостоятельных вкрапленников или продуктов замещения амфибола в щелочных базальтах многих районов мира. В виде фенокритов или минералов основной массы он обнаружен в щелочных породах основного состава – тефритах, фонолитах, лимбургитах, щелочных габбро – Германии (Grapes, Keller, 2010; Kunzmann, 1989; Soellner, 1907), России – Удоканское плато, Северо-Минусинская впадина и др. (Шарыгин и др., 2011); Франции (Lacroix, 1909; Magonthier, Velde, 1976); Гавайских островов (Johnston, Stout, 1985) и др. Рёнит, как продукт реакции

распада амфибола, был найден в расплавных включениях в авгите из образцов лунного грунта, полученных благодаря аппарату Луна 24 (Treiman, 2008), а также в щелочных базальтах Новой Зеландии (Kyle, Price, 1975), Японии (Monkawa et al., 2003), Франции (Magonthier, Velde, 1976). Обзор минералов рёнит-куратитовой серии и находки рёнита в паралавах представлены в (Peretyazhko et al., 2017). Общей закономерностью, обуславливающей нахождение рёнита в этих породах, является миаскитовый характер их щелочности (сравнительно высокая глиноземистость расплавов), тогда как для агпайтового ряда пород характерен энigmatит (Шарыгин и др., 2011).

Находки минералов подгруппы рёнита в вулканитах островодужных обстановок редки. В последнее десятилетие рёнит был обнаружен в вулканических породах толеитовой и известково-щелочной серии. Как продукт замещения амфибола, рёнит описан в пикритах офиолитов Отрис, Греция (Vaziotis et al., 2017). В качестве дочернего минерала в парагенезисе с клинопироксеном, Al-шпинелью и кислым остаточным стеклом рёнит найден в расплавных включениях в оливине из алливалитов вулкана Семячик и базальтов Ключевского вулкана (Ананьев, Селянгин, 2011).

4.3.3. Термометрия расплавных включений в оливине

Было проведено 20 экспериментов по прогреву и закалке частично раскристаллизованных расплавных включений в оливине с визуальным контролем. Эти эксперименты проводились при атмосферном давлении в аргоновой атмосфере с целью исключить потемнение поверхности минерала. Кроме этого, был проведен один массовый прогрев РВ без визуального контроля в трубчатой печи с моментальной закалкой.

Термометрические эксперименты с раскристаллизованными включениями показывают, что плавление фаз начинается с размягчения остаточного стекла при

температурах 1050-1150 °С, что сопровождается потемнением содержимого включения. Первые кристаллические фазы начинают плавиться при достижении температуры 1200-1250 °С. Полное расплавление дочерних фаз достигается при температурах 1270-1320 °С. После плавления всех твердых фаз происходит частичная гомогенизация расплавных включений, так в расплаве остается газовый пузырек, который не растворяется в жидкости при температуре 1340 °С. Таким образом температуру частичной гомогенизации можно считать 1270-1320 °С. При этом полная гомогенизация должна происходить при еще более высоких температурах.

Сильное повышение температур гомогенизации расплава может быть следствием потери летучих компонентов (Portnyagin et al., 2008; Плечов, 2014), что отмечается и в наших образцах. В таком случае результаты прогревов включений нуждаются в проверке. Для определения корректной температуры кристаллизации оливина и захвата РВ могут быть использованы модели равновесия минерал-расплав и минеральные термометры (Ford et al., 1983; Coogan et al., 2014).

4.3.4 Химический состав стекол расплавных включений

Содержание главных элементов в стеклах природно-закаленных и экспериментально сгомогенизированных стеклах расплавных включений в оливине были определены методами рентгеноспектрального микроанализа и приведены в Табл. 9S, 10S (Приложение).

Содержание главных и примесных компонентов в стеклах расплавных включений в оливине с учетом коррекции (Danyushevsky et al., 2000; Danyushevsky, Plechov, 2011) приведено в Табл. 9S, 10S (Приложение). По содержанию главных петрогенных элементов они соответствуют высокомагнезиальным низкокальциевым базальтам. По содержанию Al_2O_3 большинство расплавов являются низкоглиноземистыми, и индекс глиноземистости во всех реконструированных захваченных расплавах не превышает 1, увеличиваясь по

мере эволюции расплава (Рис. 23). В результате в некоторых включениях содержания Al_2O_3 превышают 16,5 мас. % (Рис. 23, Рис. 24а).

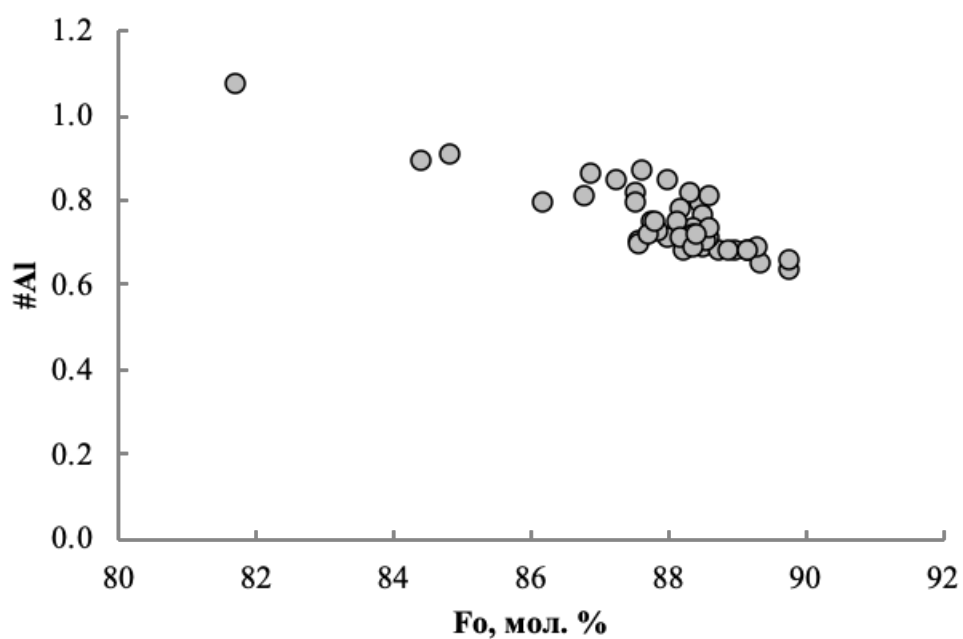


Рис. 23. Изменение глиноземистости реконструированного, захваченного первичными включениями расплава по мере кристаллизации оливина.

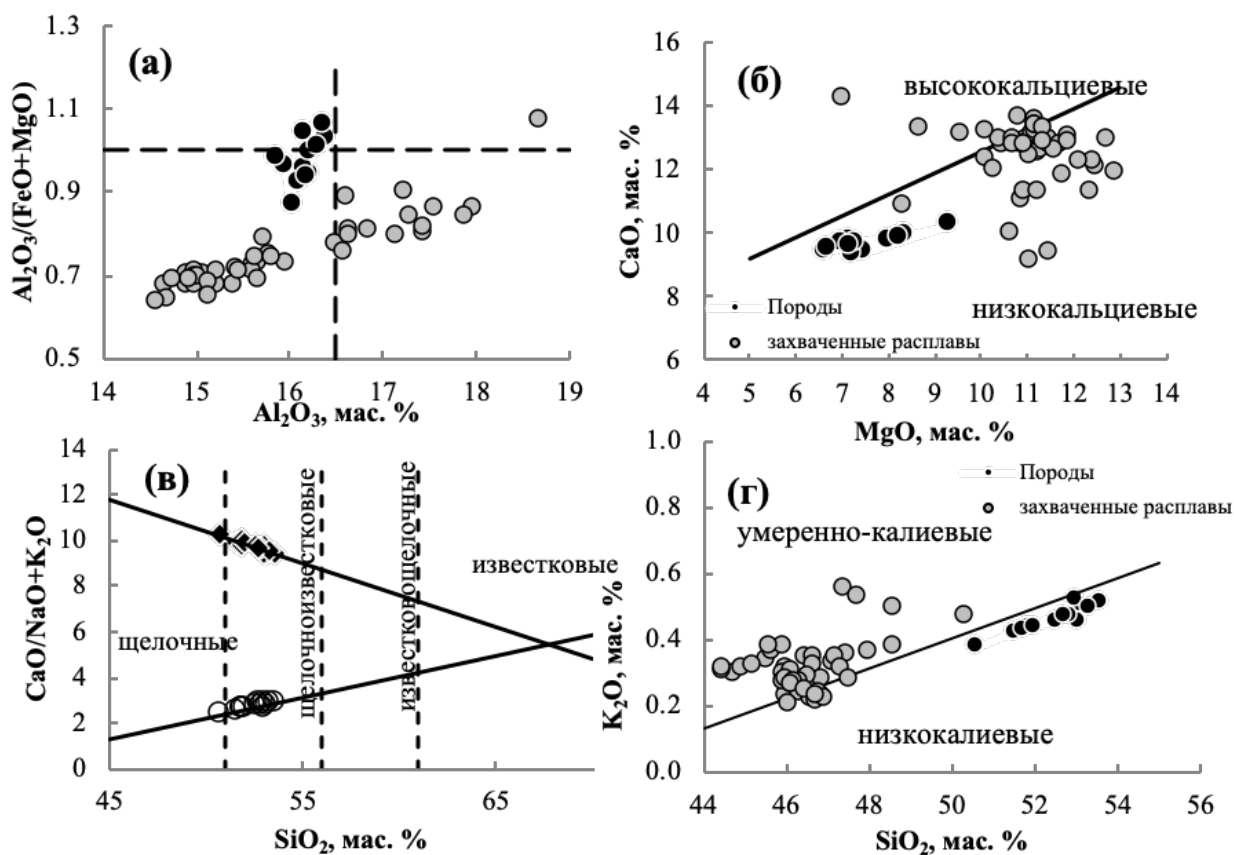


Рис. 24. Главные компоненты в расплавах и голоценовых базальтах вулкана Меньший Брат. Глиноземистость (а) по (Куно, 1960) и классификационной схеме (Магматические ..., 1983); Разделение на высококальциевые и низкокальциевые на (б) по (Macdonald et al, 2000); Индекс Пикока (в) по (Peacock, 1931); калиевость на (г) по (Gill, 1981).

По содержанию K_2O расплавы относятся к низко – умеренно калиевой островодужной серии (Рис. 24г). Несмотря на более высокое содержание кремнезема, расплавы включений в оливине из потоков и тефры конуса Восток имеют более низкие содержания K_2O – в среднем 0.27 мас. %, чем расплавы магм конуса Коротышка (в среднем 0,45 мас. % K_2O).

Захваченные во включениях в оливине обоих конусов расплавы являются более примитивными по сравнению с валовым составом породы (44,5-50,3 и 50,5-53,6 мас. % SiO_2 соответственно). Включения характеризуются повышенными содержаниями CaO , MgO и близкими значениями – $K_2O + Na_2O$ (Рис. 25).

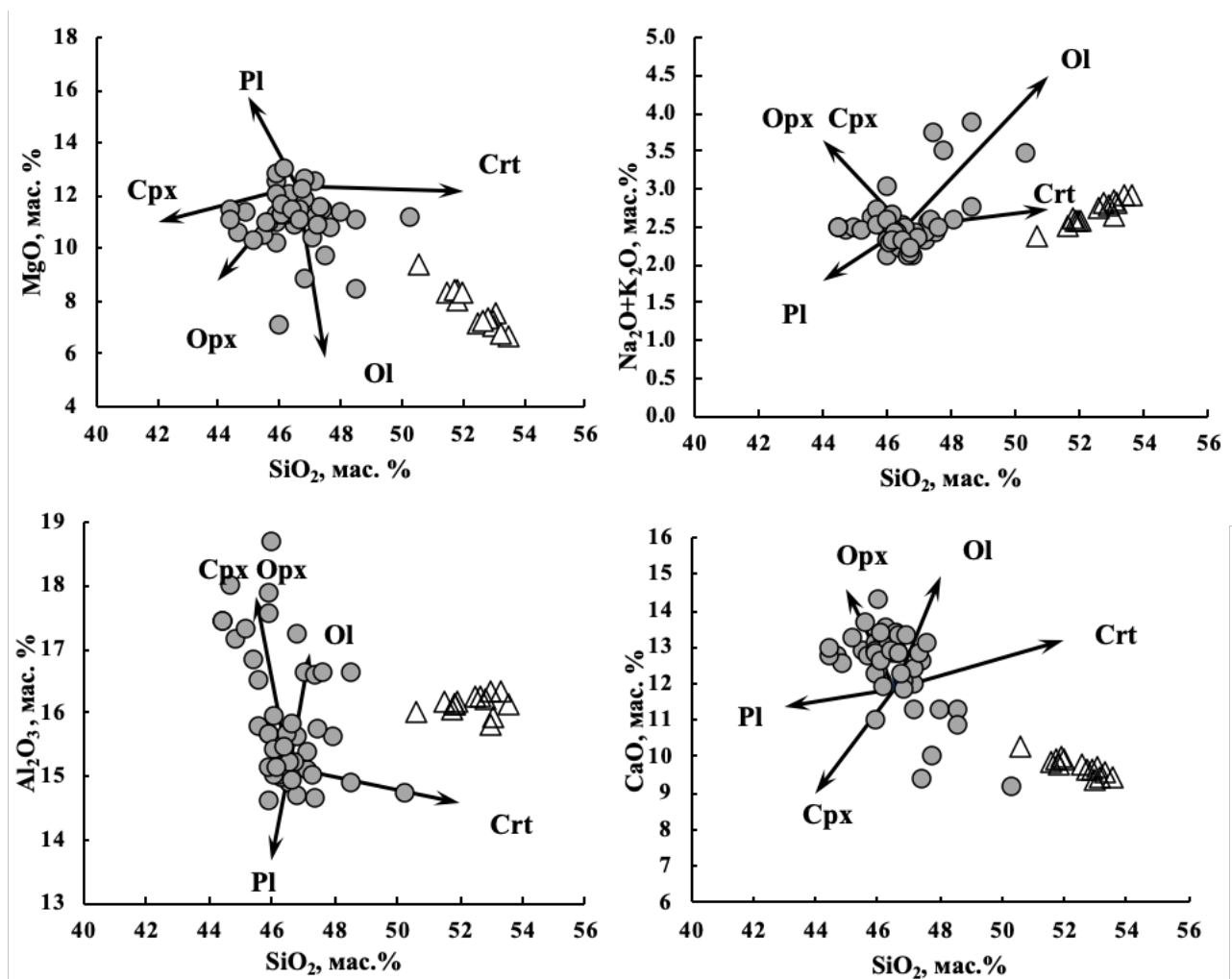


Рис. 25. Составы расплавных включений (кружочки) и составы базальтов (треугольники) конусов Восток и Коротышка в. Меньший Брат. Стрелками показаны линии контроля кристаллизации соответствующих минералов. Оpx - ортопироксен, Сpx - клинопироксен, Crt - хромит, Pl - плагиоклаз, Ol – оливин.

Содержание примесных элементов в стеклах расплавных включений приведено в таблице 8. В отличие от петрогенных элементов характер распределения редких и рассеянных близок к валовому составу пород (Рис. 26). В целом содержания элементов характерны для островодужных магм и характеризуются ярко выраженными минимумами высокозарядных элементов Nb, Zr, Ti и положительными аномалиями крупноинных литофильных элементов,

таких как Sr и Ba. Стекла расплавных включений, как и породы, обогащены Th, U, РЬ.

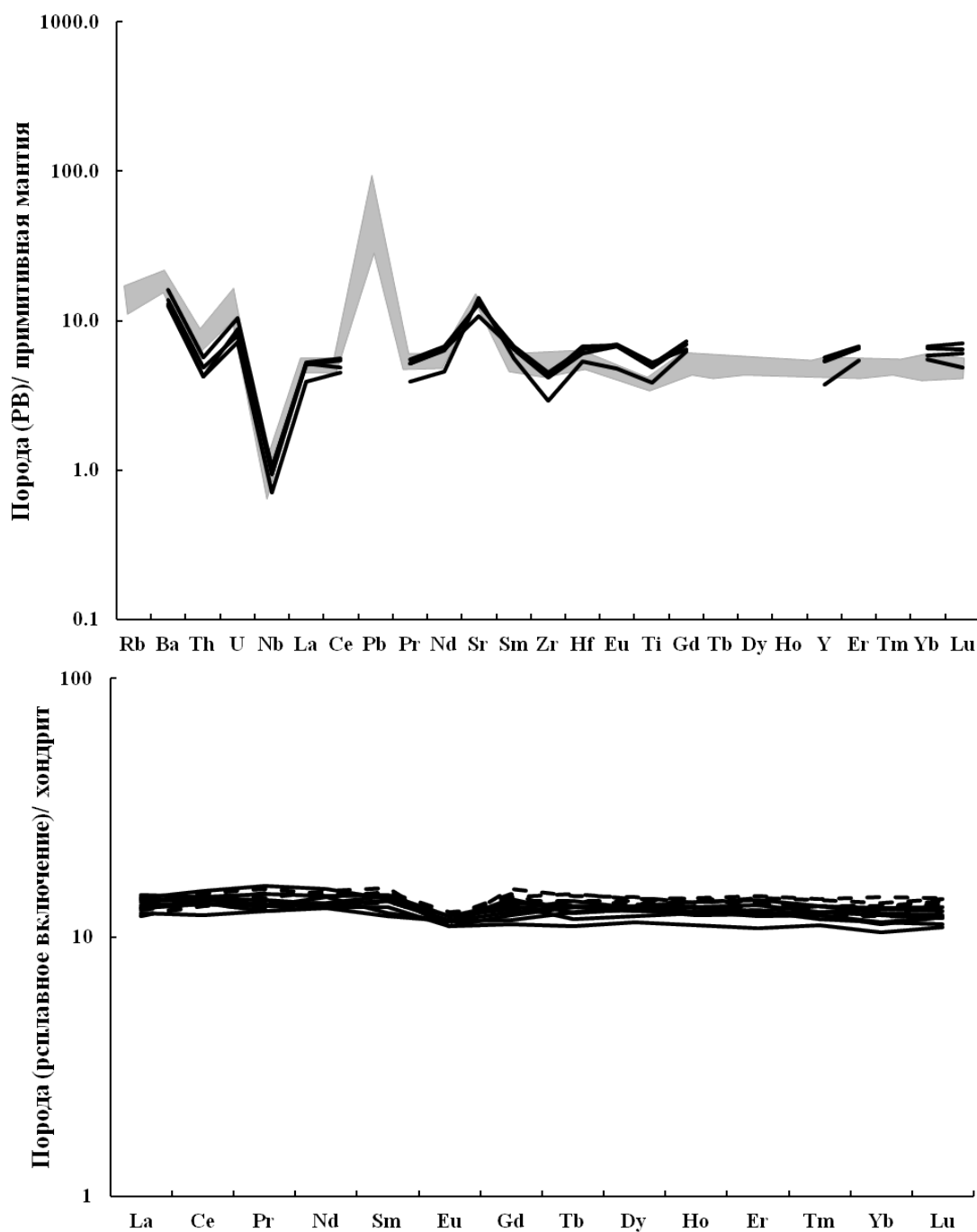


Рис. 26. Распределение редких и редкоземельных элементов в стеклах расплавных включений в оливине и в породах вулкана Меньший Брат. Серым полем обозначены составы базальтов, линия – составы стекол расплавных включений.

Распределение нормализованных на примитивную мантию концентраций тяжелых редкоземельных элементов в стеклах расплавных включений, как и в валовом составе пород горизонтальное (Gd_N/Yb_N 0,97-1,18), что может говорить об отсутствии минералов концентраторов этих элементов в рестите. Концентрации тяжелых редкоземельных элементов в стеклах расплавных включений несколько выше, чем в составах пород. Для мобильных в зонах субдукции Ba, Th, U, а также для La и Zr концентрации в породах выше, чем в захваченных расплавах.

Поведение летучих компонентов в расплаве характеризуется постепенным ростом их концентраций по мере кристаллизации оливина (Табл. 9S, 10S (Приложение)). Содержания фтора растут с 0,008 до 0,027 мас. %, хлора – с 0,08 до 0,28 мас. % по мере роста калия в расплаве. Содержания серы варьируют 0,11 до 0,21 мас. %, а фосфора от 0,01 до 0,11 мас. %. При этом концентрации S и P значимо не снижаются по мере кристаллизации расплава.

С помощью рамановской спектроскопии были получены первые данные о составе усадочных газовых пузырьков первичных РВ (Табл. 11S (Приложение)). В отличие от работы (Миронов и др., 2020), были использованы природно-закаленные частично-раскристаллизованные расплавные включения в оливине. Их расположение в пределах вкрапленника хаотичное и не приурочено к определенным внешним или внутренним зонам минерала-хозяина. Исследованные расплавные включения как правило не полностью раскристаллизованы, а содержат кристаллические дочерние фазы, остаточное закалочное стекло и хорошо выраженный усадочный газовый пузырек. На стенках этих газовых пузырьков не обнаружены каемки жидкости или кристаллы, которые могли бы повлиять на результат Рамановской спектроскопии. Размеры этих пузырьков варьировали от 4 до 20 мкм. Плотность углекислоты в газовых обособлениях соответствует $0,10 \pm 0,05$ г/см³, а наименьшие оценки содержания углекислоты в расплаве составляют 0,4 мас. %.

Первичные флюидные включения, сингенетичные расплавному включениям, были обнаружены в одном образце (Рис. 27). Их размер составляет порядка 5 мкм. При комнатной температуре они содержат только газовую фазу и по данным Рамановской спектроскопии они состоят преимущественно из малоплотной CO_2 ($0,25 \pm 0,04 \text{ г/см}^3$). Вода, азот, метан и другие газы не были обнаружены.

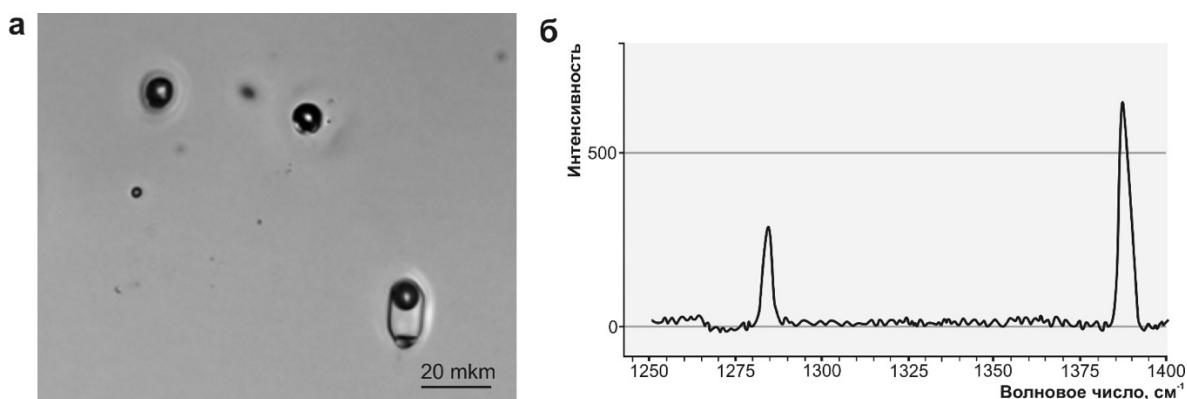


Рис. 27. Первичные флюидные включения в оливине из базальта в. Меньший Брат: а – флюидные включения и сингенетичное расплавленное включение; б – КР – спектр, демонстрирующий наличие CO_2 во включении.

Методом ГХ-МС были определены содержания летучих компонентов в газовых обособлениях расплавных включений в оливине. Выявлено 225 различных соединений, среди которых доминируют (89 отн. %) органические (Табл. 12S (Приложение)). Они представлены главным образом кислородсодержащими углеводородами (75,5 отн. %), преимущественно спиртами. Доли альдегидов, карбоновых кислот, кетонов и эфиров не превышают 7,4 отн. %. Суммарные содержания алканов и алкенов не превышают 7 отн. %. При этом их количества примерно равны. Доля циклических и гетероциклических углеводородов незначительна (< 2 отн. %).

Газовая фаза включений содержит азот-, серо- и галогенсодержащие углеводородные соединения. Среди них преобладают азотсодержащие (3,68 отн. %), в то время как серо- и галогенсодержащие не превышают 1 отн. %.

Содержание неорганических соединений составляет 11,01 отн. %, среди которых доминирует SO_2 (5,50 отн. %). Содержание азота составляет 2,87 отн. %, а воды и CO_2 в сумме не превышает 1,5 отн. %. Были обнаружены незначительные количества H_2S , COS , CS_2 , O_2 , NH_4 и благородных газов (Ar , Xe).

4.3.5. Содержание воды в расплавах

Определение содержания воды в исходных расплавах традиционно проводится на основании прямых измерений в стеклах расплавных включений методом вторично ионной масс-спектрометрии. Именно таким методом были произведены первые оценки водосодержания исходных расплавов в зонах субдукции и Срединно-океанического хребта (Sobolev, Chaussidon, 1996) и, впоследствии, других геодинамических обстановок.

Однако, в последнее время, было показано, что вода, захваченная расплавными включениями, может мигрировать из включения как в процессе извержения в лавовом потоке (Portnyagin et al., 2008; Chen et al., 2011; Gaetani et al., 2012; Vucholz et al., 2013), так и в процессе термометрических экспериментов по гомогенизации включений (Mironov et al., 2015; Kamenetsky et al., 2017), несмотря на соблюдение рекомендаций по сокращению времени высокотемпературных экспериментов для минимизации процессов диффузии. В связи с этим, данные, полученные при прямом измерении воды в стеклах расплавных включений требуют дальнейшей коррекции и их можно интерпретировать как минимальные концентрации.

По данным ВИМС, содержания H_2O в стёклах природно-закалённых РВ в оливине достигают 1,5 мас. % (Табл. 10S (Приложение)), а в экспериментально

закалённых стёклах незначительно превышают пределы обнаружения (0,5 мас. % и менее).

Содержания воды в расплаве были оценены по разнице между реальной и псевдоликвидусной температурами для одного и того же значения магнезиальности оливина с использованием моделей (Ford et al., 1983; Coogan et al., 2014) и подходов из (Almeev et al., 2007; Sobolev et al., 2016) (Табл. 6S, 9S, 10S (Приложение)). Содержание воды рассчитывалось на основании разницы температур: «сухих», рассчитанных на основе равновесия оливин-расплав (Ford et al., 1983) и «реальных», рассчитанных по оливин-шпинелевому двуминеральному термометру из (Coogan et al., 2014). «Реальные» температуры гораздо ниже «сухих» в силу присутствия значительного количества воды в расплаве при кристаллизации минералов. Результаты этих оценок показывают, что содержание воды в расплаве падало по мере подъёма и кристаллизации расплава от 5 мас. % в равновесии с оливином $Fo_{89,5}$ до практически полного её отсутствия в равновесии с $Fo_{86,5}$ (Рис. 28) (Низаметдинов и др., 2019).

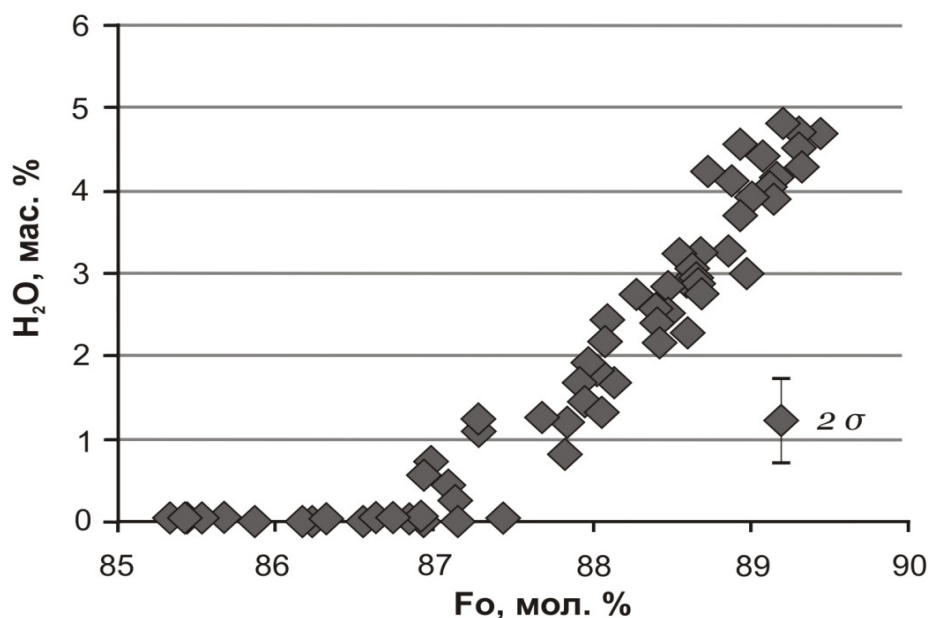


Рис. 28. Исходные содержания и эволюция водосодержания базальтового расплава по данным о составе расплавных включений и минеральных включений хромистой шпинели во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана Меньший Брат.

Значимые содержания воды в остаточных стеклах частично-раскристаллизованных расплавных включений подтверждаются и Рамановской спектроскопией наличием пиков в высокочастотной области спектра 3100-3600 см^{-1} (Рис. 29). В Табл. 8S (Приложение) приведены составы этих стекол. Обращает на себя внимание достаточно большой разброс в дефиците суммы анализов остаточных стекол расплавных включений от 1 до 12 мас. %. В большинстве случаев подобный дефицит образуется за счет неизмеряемых элементов. С учетом того, что определение состава проводилось методом ЭДС рентгено-спектрального микроанализа, то дефицит суммы может быть вызван наличием в стеклах легких элементов: С, N, В, и в первую очередь воды, которые не определяются этим методом. Как уже было показано, содержание воды в исходных расплавах базальтов вулкана Меньший Брат могло достигать 5 мас. %. Если учесть кристаллизацию оливина-хозяина на стенках включения и кристаллизацию дочерних высокоглиноземистых минералов, для которых вода является несовместимым компонентом, то можно предположить, что по мере уменьшения объема остаточного стекла количество воды в нем будет возрастать. При этом если потеря воды при постзахватной эволюции включения была минимальной, то количество воды в остаточном стекле может увеличиться в несколько раз, что и должно привести к наблюдаемому недостатку суммы анализов остаточных стекол.

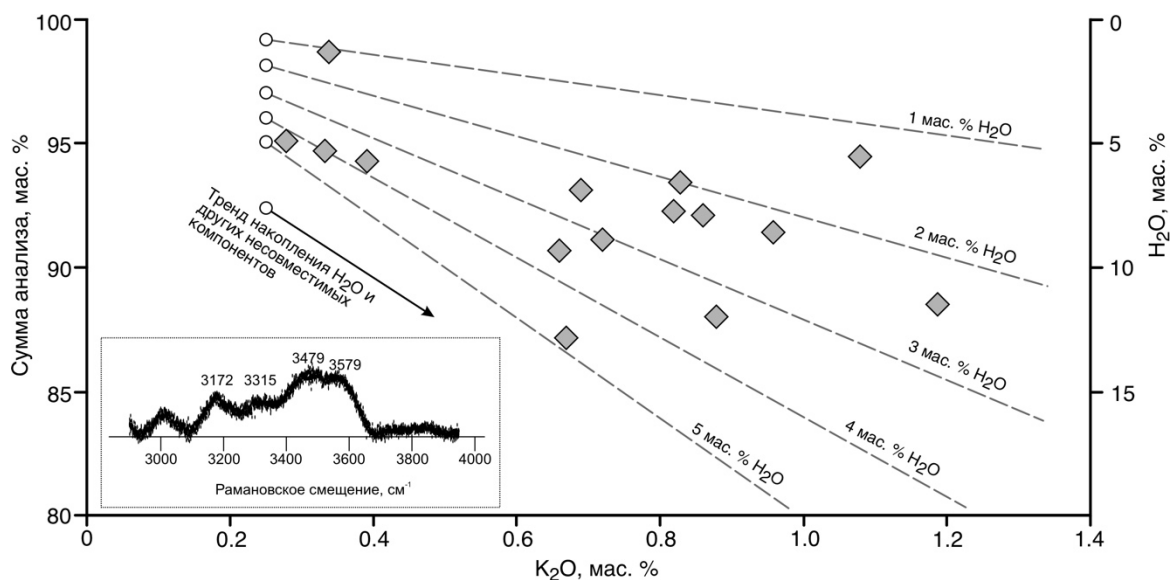


Рис. 29. Зависимость суммы окислов в составе стекол расплавных включений в оливине от степени накопления калия в этих стеклах. Пунктирные линии – расчетное накопление H_2O по мере кристаллизации оливина на стенках и дочерних фаз с различными начальными концентрациями от 1 до 5 мас. %. На врезке - высокочастотная часть спектра комбинационного рассеяния остаточного стекла включений с характерными пиками в области $3172-3579\text{ см}^{-1}$, характеризующими наличие воды в стекле.

Для проверки достоверности вышеизложенных рассуждений можно использовать другой несовместимый для кристаллизующейся ассоциации дочерних минералов элемент – К. Если во включении будет происходить значительное отложение оливина на стенках и кристаллизация дочерних фаз, то в расплаве будут возрастать не только содержание воды, но и калия. Как показано на (Рис. 29), между содержанием K_2O в остаточных стеклах расплавных включений и суммой оксидов при электронно-зондовом анализе этих стекол имеется обратная корреляция. Анализы с наибольшими содержаниями калия характеризуются наибольшими дефицитами сумм оксидов, что и подтверждает, что недостаток суммы определяется влиянием воды и не является артефактом.

4.4. Основные магмы и их источник

4.4.1. Состав и особенности первичных расплавов

Состав первичного расплава, из которого кристаллизовалась ликвидусная ассоциация (оливин и шпинель), был определен на основе состава первичных расплавных включений, захваченных оливином (Табл. 9S (Приложение)). Составы захваченных расплавов были пересчитаны до равновесия с немного более магнезиальным оливином, чем был встречен в изученных базальтах - с $F_{90,4}$, что фактически подразумевало масс-балансовый расчет добавления всего закристаллизованного оливина в расплав (см. методы в разделе 3.1.1.). Содержание редких и редкоземельных элементов так же было скорректировано на добавление оливина в расплав.

Реконструированные расплавы, равновесные с ликвидусным оливином, имеют пикробазальтовый состав, характеризующийся содержаниями SiO_2 44,3-48 мас. %, и MgO - 13,8 мас. % и относятся к низко-умеренно калиевой низкоглиноземистой серии пород с повышенным для Курило-Камчатского региона содержанием магния (Чибисова и др., 2009). Результаты проведенных исследований показывают, что исходные расплавы для пород конусов Восток и Коротышка отличаются только содержанием K_2O . Расплавы, из которых кристаллизовался ликвидусный оливин пород конуса Коротышка, могут быть отнесены к умереннокалиевой серии, в то время как ликвидусный оливин пород конуса Восток образовался преимущественно из низкокалиевых расплавов.

Как показано на рисунке выше (Рис. 25), валовые составы продуктов извержений не соответствуют составам расплавов, из которых кристаллизовались оливин и шпинель. Фракционированием этих минералов можно приближенно объяснить только вариации MgO и Al_2O_3 . Содержания щелочей и CaO требуют не фракционирования, а добавления к имеющемуся расплаву клинопироксена.

Снижение содержания K_2O в породах по сравнению с исходным расплавом также не может быть объяснено с позиций фракционной кристаллизации единой магмы.

Также трудно объяснить с позиций фракционной кристаллизации единой магмы характер распределения редких и рассеянных элементов. Известно, что некогерентные элементы должны накапливаться в расплаве и, в случае процессов фракционирования, их содержания в породе должны быть выше, чем в расплавах. При кристаллизации оливина и хромита несовместимыми будут практически все редкие и рассеянные элементы за исключением Cr и Li, которые могут присутствовать в примесных количествах в оливине или Zn и V в хромите. На поведение мобильных элементов оказывает влияние наличие или отсутствие флюидной фазы в ходе эволюции магмы. Такие элементы как Th, U, Pb, в силу высокой подвижности должны иметь более высокие концентрации в исходных не дегазированных расплавах и снижаться в продуктах извержений. Данные о составе расплавов в РВ в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат показывают противоположную картину. Расплавы, из которых кристаллизуются ликвидусные минералы обогащены по сравнению с породами тяжелыми РЗЭ (Er, Yb, Lu), в то время как породы обогащены мобильными Th и U (Рис. 30, Рис. 26).

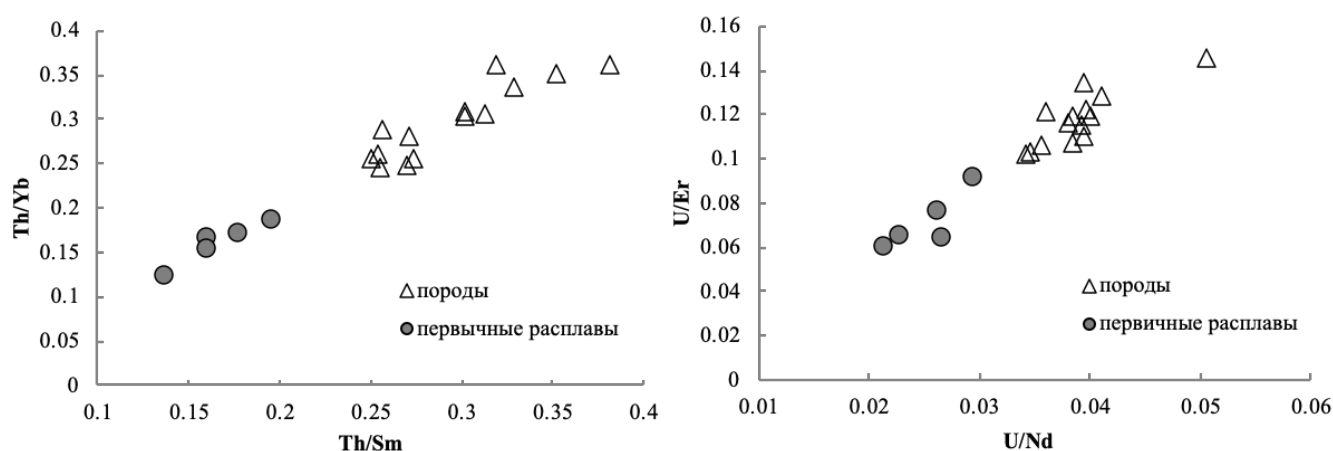


Рис. 30. Отношение мобильных компонентов (Th и U) к средним и тяжелым редким элементам в базальтах и исходных расплавах, из которых кристаллизовался ликвидусный парагенезис базальтов вулкана Меньший Брат.

Для изученных пород и первичных расплавов отмечается положительная Sr аномалия (Рис. 26а), которая является характерной региональной особенностью (Ерёмина и др., 2014) для базальтов и их дифференциатов, высокоглиноземистых и магнезиальных андезитобазальтов Камчатки. Она характерна для базальтов Харчинского вулкана (Ерёмина и др., 2014; Секисова и др., 2021), глинозёмистых плагиобазальтов вулкана Плоский Толбачик, магнезиальных базальтов и андезитобазальтов вулкана Ключевской (Ерёмина и др., 2014), базальтов Карымского вулкана (Тобелко и др., 2019), пород вулкана Жупановский (Плечова и др., 2011) и других проявлений основного вулканизма Камчатки и Курил (Мартынов А.Ю. и др., 2015; Smirnov et al., 2021).

Эта особенность может свидетельствовать о схожей эволюции островодужных магм Курило-Камчатской системы, имеющих близкий по геохимии источник. При этом фракционирования плагиоклаза при ранней эволюции основных мантийных расплавов не происходит.

4.4.2. Летучие компоненты в первичном расплаве

Летучие компоненты, и в первую очередь H_2O и CO_2 , оказывают важнейшее влияние на условия образования исходных расплавов и их дальнейшей эволюции. Первичные основные магмы в зонах субдукции могут выплавляться в мантийном клине при активном участии флюидов, выделяющихся при дегидратации субдуцирующей океанической коры (Stolper et al., 1994; Schmidt et al., 1998; Van Keken et al., 2002; Portnyagin et al., 2007; Kelley et al., 2010; Grove et al., 2012).

В последние годы на основе современных методических подходов получены новые оценки по содержанию воды в первичных расплавах различных геодинамических обстановок. После работы (Plank et al., 2013), показавшей средние содержания воды в базальтовых расплавах порядка 4 мас. %, появились новые определения водосодержания первичных расплавов для фронтальных вулканов Камчатки: Ключевского, Толбачика, Жупановского, Горелого, Карымского (Тобелко и др., 2019; Назарова и др., 2017; Mironov et al., 2015; Kamenetsky et al.,

2017, и др.), которые показывают, что первичные расплавы содержали значительно больше воды, чем считалось ранее. И эти содержания могли достигать 5 мас. %. Столь значительные содержания заставляют пересмотреть температурные параметры плавления исходного субстрата и эволюции расплавов. Именно оценка водосодержания первичных расплавов является наиболее важной целью при обсуждении островодужного вулканизма.

Первые оценки содержания воды в исходных расплавах для базальтов в. Меньший Брат основанные на прямых измерениях в первичных расплавных включениях приведены в работе (Коваленко и др., 2004) и составляют 0,07 мас. %. Полученные нами концентрации воды в экспериментально гомогенизированных первичных расплавных включениях находятся в диапазоне 0,37-1,5 мас. % (таб. 8) и интерпретируются нами как минимально возможные содержания. Одно из измеренных включений показывает содержание воды менее 0,01 мас. %, и при этом аномально низкие содержания хлора, что служит однозначным критерием вскрытия и дегазации включения в процессе эксперимента.

Как было показано в разделе 4.3.4, на основании методики оценки водосодержания, предложенной в (Sobolev et al, 2016) и основанной на факте изменения температуры ликвидуса оливина в зависимости от содержания воды в расплаве (Almeev et al., 2007) показано, что содержание воды в исходном расплаве базальтов вулкана Меньший Брат достигало 5 мас.% и закономерно снижалось по мере эволюции расплава ,связанной с кристаллизацией ликвидусной ассоциации, представленной оливином и шпинелью (Низаметдинов и др, 2019).

Другие оценки количества воды при кристаллизации базальтов в. Меньший Брат, основанные на изменении дефицита суммы рентгеноспектрального анализа остаточных стекол расплавных включений, содержащих необычную высокоглиноземистую ассоциацию дочерних кристаллов, содержащую минерал подгруппы ренита, подтверждают, что количество воды в захваченных расплавах могло достигать 5 мас%.

Полученные значения плотности углекислоты в газовых обособлениях природнозакаленных расплавных включений, составляющие в среднем $0,1 \pm 0,05$ г/см³, практически вдвое ниже, чем оценки по флюидным включениям ($0,25$ г/см³). Это может свидетельствовать о лишь частичном переходе CO₂ в усадочный пузырек при закалке расплавных включений и может рассматриваться как минимальные содержания углекислоты.

Если температуры захвата флюидных включений принять за 1100–1170 °С, то давление захвата флюидных включений во время дегазации не могло превышать 1 кбар. На основании экспериментов по растворимости (Shishkina et al., 2010) концентрация CO₂ в базальтовом расплаве оценена около 400 ppm, что согласуется с измерениями содержания углекислоты в стекле. Это подразумевает, что её выделение в виде флюида происходило уже в приповерхностной камере, на глубинах, не превышающих 3 км.

Содержания хлора в стеклах расплавных включений составляют 0,07-0,27 мас. % и показывают четкую положительную корреляцию с другим несовместимым элементом – калием (Табл. 9S, 10S (Приложение)). Наиболее низкие содержания хлора в расплавных включениях (в особенности ниже 0,1 мас. %) объясняются вероятным вскрытием РВ в процессе эксперимента по гомогенизации сопровождающееся потерей летучих компонентов. Наиболее низкие содержания хлора могут служить хорошим критерием герметичности и сохранности расплавных включений в процессе эксперимента.

Содержания фосфора в реконструированных захваченных расплавах варьирует от 0,063 до 0,125 мас. %, и, так же, как и хлор, показывает положительную корреляцию с K₂O (Рис. 31).

Наиболее интересной особенностью является четкое различие по содержанию летучих компонентов в захваченных расплавах разных кратеров. Расплавы, захваченные в базальтах кратера Коротышка, содержат более высокие

концентрации летучих компонентов и калия по сравнению с расплавами кратера Восток (Табл. 9S, 10S (Приложение), Рис. 31).

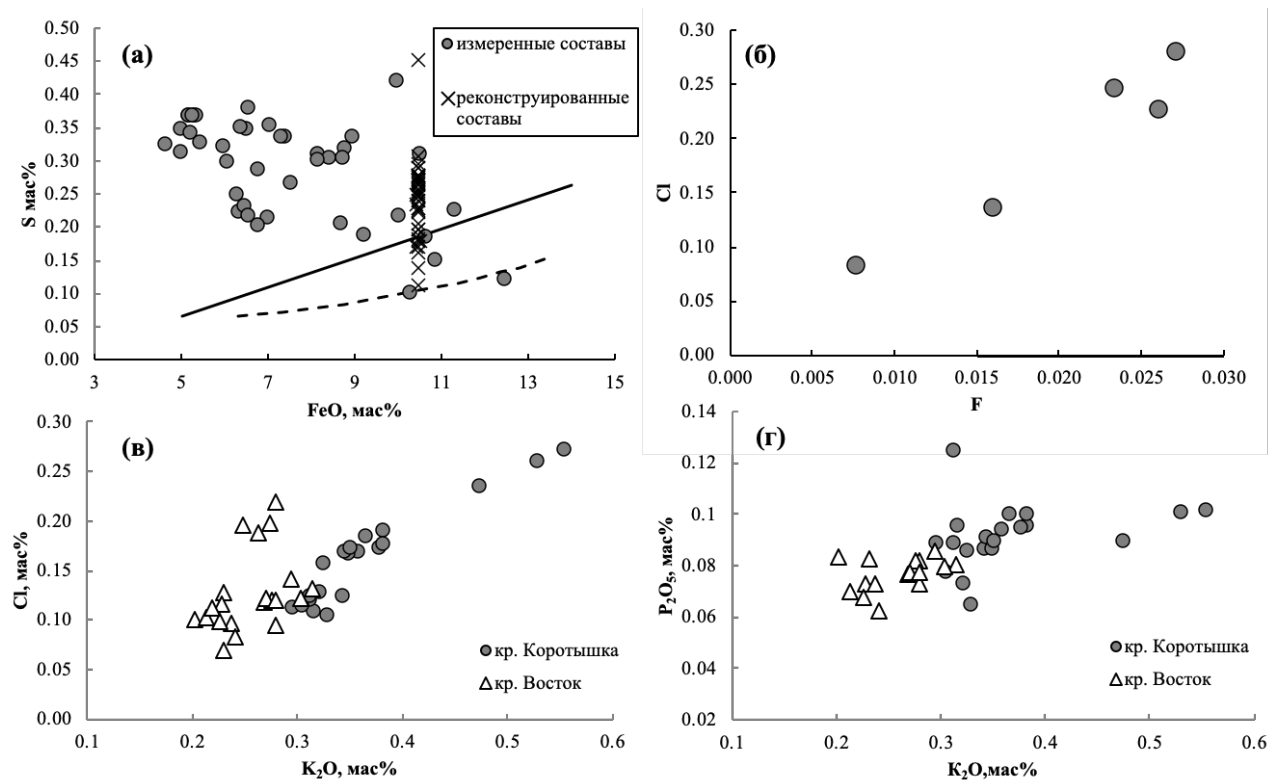


Рис. 31. Сера, хлор, фосфор и фтор в захваченных расплавах в оливине из базальтов в. Меньший Брат: а - сплошная линия - линия насыщения базальтового расплава серой (Mathiz, 1976); пунктирная линия – экспериментальная кривая насыщения базальтового расплава при $T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 1 атм. (Haughton, 1974); б – содержания F и Cl по данным ВИМС; в, г – измеренное методом ВДС.

По данным ВИМС содержание F в расплавах составляет от 70 до 270 г/т. Он хорошо коррелирует с Cl и как несовместимый элемент накапливается в расплаве по мере его эволюции (Рис. 31). F/Cl отношение при этом достаточно стабильно: 8,5-10,5, что может говорить об отсутствии кристаллизующихся минералов концентраторов этих элементов и других процессов с их участием.

Содержания серы в стеклах расплавных включений составляет от 0,09 до 0,45 мас % (Рис. 31а). Принципиальных различий в содержании серы в

реконструированных захваченных расплавах различных кратеров не наблюдается. Полученные значения в большинстве своем находятся выше экспериментальной линии насыщения базальтового расплава серой (Haughton, 1974), и по большей части превышают линию составов стекол включений, содержащих сульфидную фазу (Mathiz, 1976) (Рис. 31а). Несмотря на то, что самостоятельной сульфидной фазы в расплавных включениях нами обнаружено не было, можно с уверенностью утверждать, что захваченные расплавы были близки к уровню насыщения при текущих P - T - fO_2 параметрах захвата.

4.4.3. Температуры кристаллизации ликвидусного парагенезиса

Определение температур кристаллизации ликвидусной ассоциации на основании данных о температурах гомогенизации первичных расплавных включений в оливине оказалось затруднительным. Как уже говорилось выше, достичь полной гомогенизации РВ не удалось даже при температуре, превышающей 1300°C . По-видимому, достаточно сильный эффект на температуры гомогенизации оказывает вероятная потеря воды РВ как в процессе эксперимента, так и непосредственно в процессе извержения при низких скоростях закалки в лавовом потоке (Portnyagin et al., 2008; Mironov et al., 2015). В таком случае единственным способом оценки температур остаются расчетные температуры равновесия оливин-расплав и минералогические термометры. Температуры равновесия оливин-расплав были рассчитаны с помощью программы Petrolog 3 (Danyushevsky, Plechov, 2011), при этом была использована модель равновесия оливин-расплав (Ford et al., 1983), кислородный буфер $\text{Ni-NiO}+0,3$ и модель распределения $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ (Borisov, Shapkin, 1989). Эта модель равновесия наиболее точно описывает равновесие в области мантийных температур (Крашенинников и др., 2017), однако не учитывает содержание воды и показывает температуры сухого ликвидуса системы, который обычно выше реальных температур захвата РВ. Температуры равновесия, полученные по этой модели, составляют 1145 - 1305°C .

Из минералогических термометров наиболее востребован термометр, основанный на распределении Al между оливином и шпинелью (Wan et al., 2008; Koogan et al., 2014). Температуры, полученные по этим уравнениям, составляют 1090-1220 °С. Эти значения наиболее близки к реальным температурам кристаллизации оливин-шпинелевой ликвидусной ассоциации, так как этот метод не чувствителен к содержанию воды в расплаве.

4.4.4. Температура и глубина образования флюида

На основании подходов, изложенных в (Plank et al., 2007; Herrmann, Spandler, 2008), и полученных данных по содержанию Ce, K, H₂O в исходных расплавах базальтов вулкана Меньший Брат, была проведена оценка температуры образования флюида, отделяющегося от субдуцирующей плиты. Ключевыми моментами в этих моделях является предположение, что отношение мобильных компонентов, таких как Ce, K, H₂O, в представленных на поверхности породах наследуется из отделяющегося от погружающейся плиты флюида и мало чувствительно к процессам плавления и дифференциации. При этом количественные значения этих отношений могут характеризовать температуру отделяющегося флюида и, как следствие, глубину субдуцирующей плиты под объектом исследования.

Содержание воды в исходных расплавах было принято в 5 мас. % (Низаметдинов и др, 2019). Средние содержания K₂O в исходных расплавах составляют 0,34 и 0,24 мас. % для кратеров Восток и Коротышка соответственно (Табл. 9S, 10S (Приложение)). Содержания Ce от 6,9 до 11,9 г/т (Табл. 10S (Приложение)) использованы по данным о составе первичных расплавных включений. Необходимо отметить, что средние значения Ce в реконструированных первичных расплавах и валовых составах пород практически полностью идентичны и составляют 8,5 г/т. Исходя из этих значений отношения будут составлять 0,048-0,068 для K₂O/H₂O и 4212-7275 для H₂O/Ce.

По данным сейсмического зондирования фокальная зона землетрясений и зона отделения флюида под о. Итуруп находится на глубине 100-120 км (Авдейко и др., 2006; Syracuse et al., 2010). В соответствии с моделями (Syracuze et al., 2010) температура поверхности слэба для Южных Курил должна составлять 665 – 695°C при давлении 35 – 40 кбар. Опираясь на геохимические параметры расплавов (отношение K_2O/H_2O), из которых кристаллизовался оливин вулкана Меньший Брат и результаты экспериментов, приведенных в работе (Herrmann, Spandler, 2008), температура отделяющегося от слэба флюида при давлениях 35 кбар будет находиться в районе 675°C, что хорошо согласуется с представленными выше сейсмическими данными и результатами моделирования.

Оценка температуры, проведенная на основании уравнения для отношения H_2O/Se , предложенного в работе (Plank et al., 2009), показывает, что температура дегидратации пород слэба составляла 726-776°C, что, в среднем, заметно выше оценок на основании отношения K_2O/H_2O .

Вариации отношений некоторых несовместимых элементов, таких как La/Yb и Nb/Y , в первичных расплавах, показывающие хорошую зависимость от глубины погружающейся плиты (Рис. 32), показанные для некоторых фронтальных вулканов Камчатки в работе (Плечова и др., 2011), позволяют провести геохимическую оценку глубины слэба и под о. Итуруп. $La/Yb = 1,06-1,29$ и $Nb/Y = 0,027-0,033$ показывают глубины порядка 95 - 105 км, что хорошо согласуется с изложенными выше оценками по геофизическим данным (Авдейко и др., 2006) и результатами моделирования (Syracuze et al., 2010).

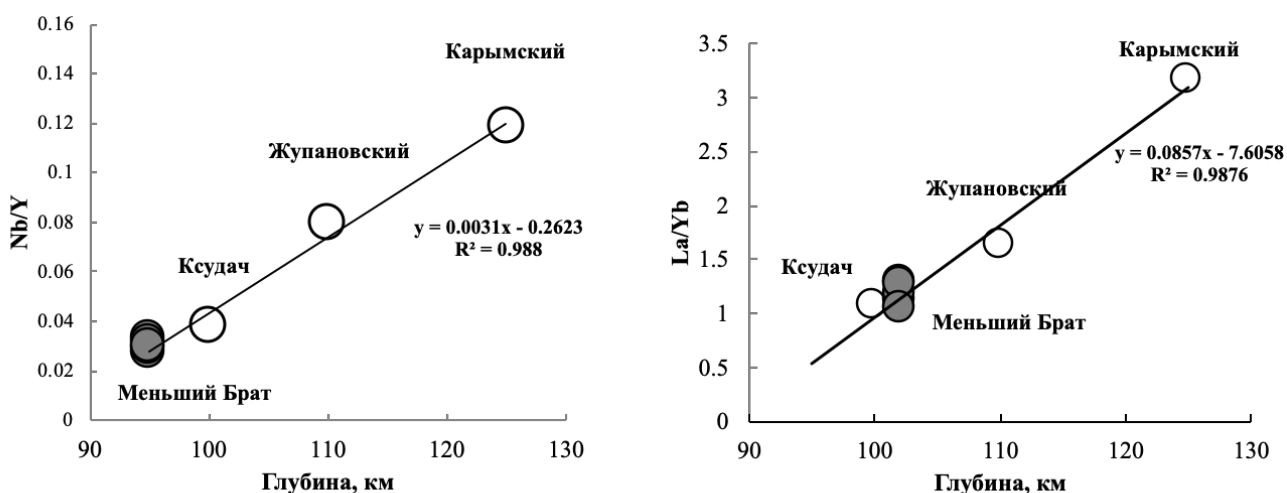


Рис. 32. Отношения некоторых несовместимых элементов в расплавных включениях из оливинов базальтов вулкана Меньший Брат и некоторых фронтальных вулканов Камчатки (Плечова и др., 2011) против глубины субдуцирующей плиты. Средние значения для вулкана Ксудач и Карымский (Portnyagin et al., 2007), для вулкана Жупановский (Плечова и др., 2011). Значение глубины субдуцируемой плиты для в. МБ рассчитано на основании регрессии, полученной по данным из работы (Плечова и др., 2011)

4.4.5. Состав оливина и состав источника

Петрографические особенности продуктов голоценовых извержений вулкана Меньший Брат позволяют сделать заключение, что доминирующим минералом ликвидусной ассоциации вкрапленников является оливин, совместно или непосредственно перед которым образовалось небольшое количество хромистой шпинели. Монотонное увеличение содержания Са по мере снижения магнезиальности однозначно свидетельствует об отсутствии в парагенезисе с оливином плагиоклаза и клинопироксена. При этом обращает на себя внимание отчетливое более низкое содержание СаО в оливинах конуса Коротышка по сравнению с оливинами из базальтов конуса Восток (Рис. 13). Подобные различия не могут быть связаны с фракционированием одной магмы и, вероятнее всего, отражают особенности различных источников магм.

На основании данных по содержанию элементов примесей в оливине, была выполнена оценка состава источника, из которого образовывались основные расплавы. Содержания Ni и Mn в расплаве весьма чувствительны к составу источника и ликвидусный, наиболее магнезиальный, оливин наследует эти характеристики (Sobolev et al., 2007).

Содержание никеля в мантийных выплавках должно контролироваться преимущественно количеством оливина в рестите. Из этого следует, что плавление перидотита даст расплав с относительно низким содержанием никеля, в то время как высоконикелиевые расплавы предполагают плавление безоливинового протолита, которым, как показано в работе (Sobolev et al., 2007), может быть пироксенит. Приведенные в таблице 5 и 6 содержания Ni и Mn в наиболее магнезиальных оливинах показывают, что основным источником вещества при образовании первичных расплавов выступал перидотит с небольшой примесью безоливинового компонента (Рис. 33), в качестве которого могли выступать как пироксениты мантийного клина, так и пироксениты нижней части островодужной коры (Jull, Kelemen, 2001; Некрылов и др., 2018). Значимых различий в содержании и соотношении Ni и Mn между расплавами, формировавшими базальты конусов Восток и Коротышка, не установлено (Рис. 33). Это может говорить о едином источнике, несмотря на имеющиеся небольшие различия в содержании СаО в оливинах. Для объяснения последних можно предположить контаминацию магм, питавших извержения конуса Восток породами с высоким содержанием СаО, либо несколько различное содержание пироксенитового компонента в источнике.

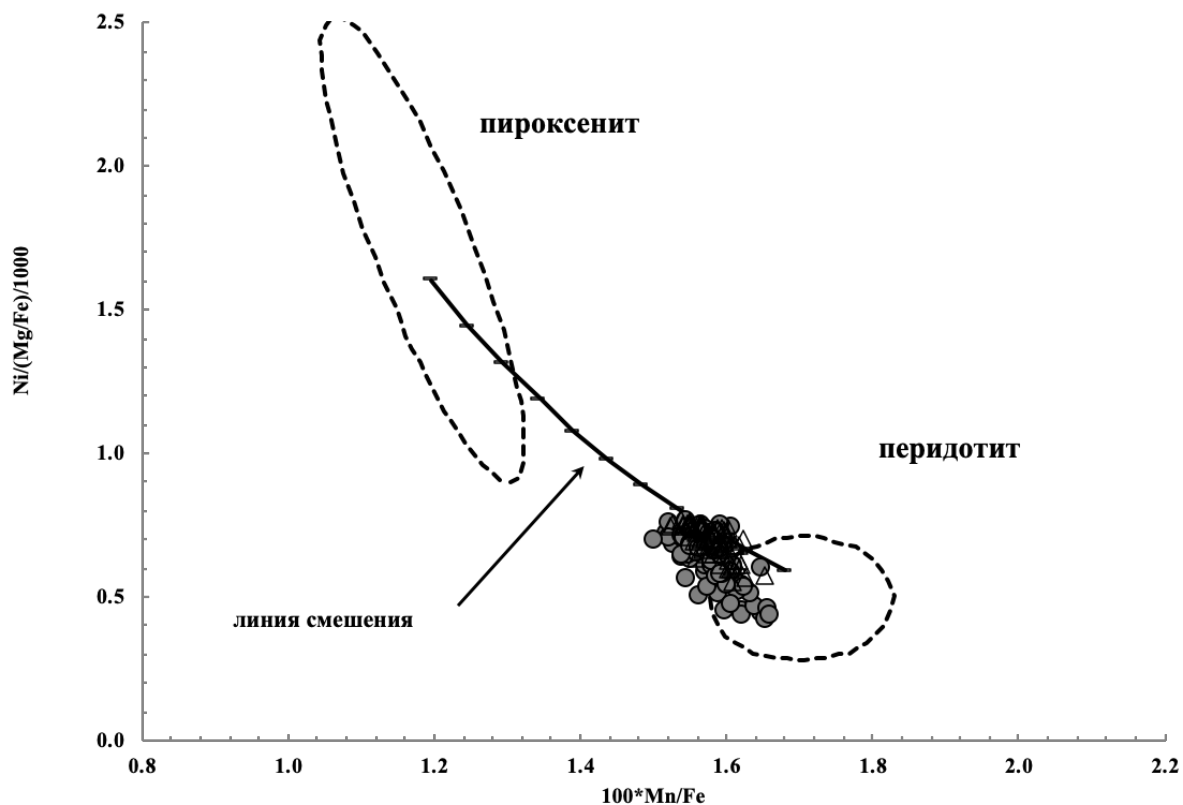


Рис. 33. Состав источника и линия смешения компонентов, участвовавших в образовании исходных расплавов, из которых кристаллизовались базальты вулкана Меньший Брат на основании содержания Ni и Mn в наиболее магнезиальных ликвидусных оливинах по (Sobolev et al, 2007). Кружки – оливины кратера Восток, треугольники – оливины кратера Коротышка

4.4.6. Температура и степень плавления мантийного субстрата

Для определения температурных параметров плавления мантийного субстрата была использована модель, основанная на величине отклонения температуры плавления перидотита от сухого солидуса в зависимости от содержания воды в субстрате и степени его плавления (Portnyagin et.al. 2007). В ней использована идея о зависимости температуры плавления перидотита от водосодержания и степени плавления мантийного субстрата. Как было показано в (Низаметдинов и др., 2019), содержание воды в исходных расплавах могло

достигать 5 мас.%. Степень же плавления мантийного источника была оценена несколькими различными методами.

1. На основании данных о хромистости ликвидусной шпинели может быть проведена оценка степени плавления мантийного субстрата по модели (Hellebrand et al, 2001). Включения шпинели в наиболее магниальном оливине имеют $Cr\# = 0,53-0,58$. Используя уравнение: $F = 10 \times \ln(Cr\#) + 24$, степень плавления мантийного субстрата составляет 17,6-18,6 мас. %.

2. Степень плавления мантийного субстрата, оцененная по методу, предложенному в работе (Nekrylov et al, 2018), основанному на положении, что содержание титана в ликвидусной шпинели, находящейся в равновесии с наиболее магниальным оливином, контролируется исключительно степенью плавления мантийного источника. Используя модель частичного плавления (Shaw, 1970) мантийного источника типа DMM, и предположение, что содержание TiO_2 в ликвидусной шпинели имеет хорошую корреляцию с содержанием TiO_2 в расплаве (Kamenetsky et al, 2001), до начала кристаллизации других титансодержащих минералов. Используя уравнение из (Nekrylov et al 2018):

$$F = -0,06158 + 0,11635 \times (TiO_{2sp}) - 0,833$$

где F – степень плавления мантийного субстрата, и содержание TiO_2 в шпинели, включенной в наиболее магниальный оливин – F_{090} . При содержании $TiO_2 = 0,33-0,45$ мас. %, степень плавления составляет 17-25 мас. %.

3. Геохимический метод оценки степени плавления, предложенный в работе (Portnyagin et.al., 2007), учитывающий вклад субдукцированного компонента и двухстадийную систему плавления, использующий наименее мобильные в зонах субдукции элементы, показывает степени плавления 4-6 мас. % после предварительного плавления с удалением расплава в 2-6 мас. %.

Полученные оценки по содержанию воды в исходных расплавах (до 5 мас. %) и оценки степени плавления исходного мантийного субстрата (9-25 мас. %)

позволяют предположить, что образование исходного расплава могло происходить при температурах от 25 до 75 °С ниже сухого солидуса перидотита, что составляет 1200-1250 °С (Рис. 34). Близкие температуры плавления мантийного источника – на 50-75 °С ниже сухого солидуса перидотита оценены для вулканических центров Камчатки: в. Ключевской, в. Толбачик, в. Карымский, Жупановский (Mironov et al., 2015; Kamenetsky et al., 2017; Плечова и др., 2011; Тобелко и др., 2019), расположенных во фронтальной зоне Курило-Камчатской островной дуги.

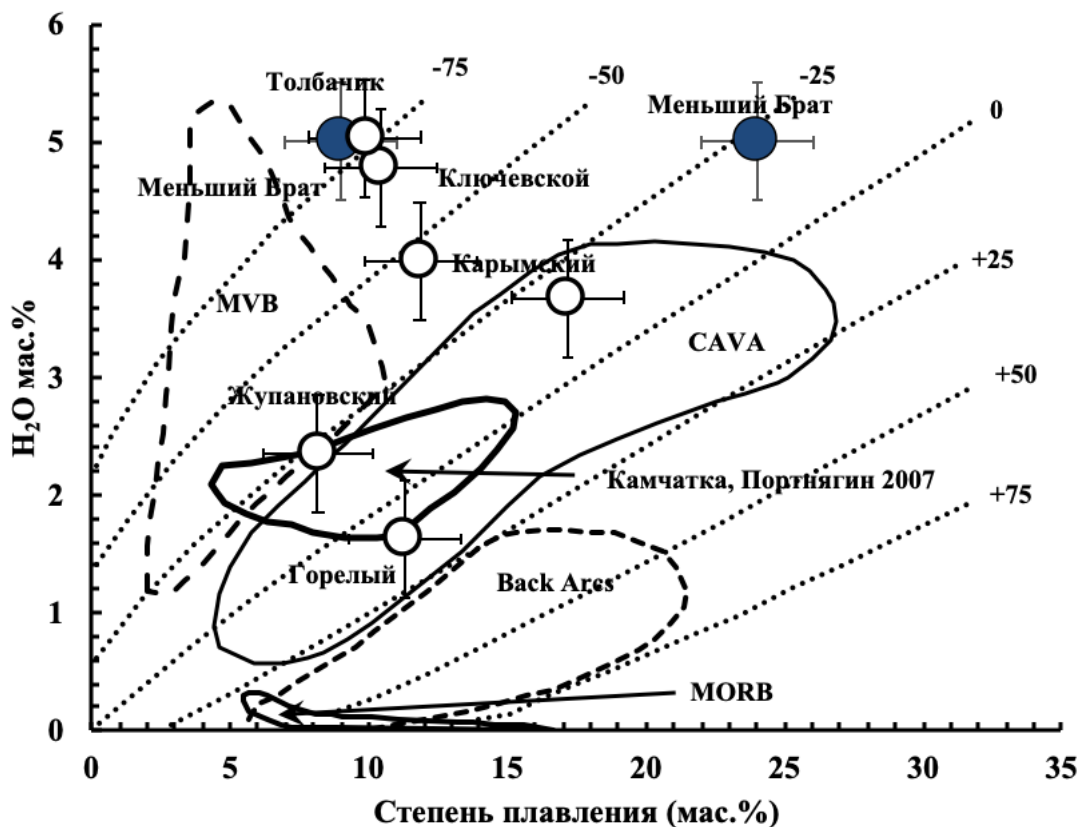


Рис. 34. Параметры мантийного плавления в зависимости от степени плавления и водосодержания исходных расплавов по (Портнягин и др., 2007) с дополнениями по Камчатским вулканам (Тобелко и др., 2019). MORB – срединно океанические хребты; CAVA – центрально Американский вулканический пояс; Back Arcs – базальты задуговых бассейнов; MVB – Мексиканский вулканический пояс.

Полученные нами данные о составе и РТ параметрах источника высокомагнезиального посткальдерного вулканизма довольно хорошо согласуются с новыми данными по геохимическому моделированию представленными в работе (Martynov et al., 2022). Однако наши оценки температур плавления источника несколько ниже из-за предполагаемой нами более существенной роли воды в этих процессах. Так же предлагаемый в работе (Коваленко и др., 2004) источник для высокомагнезиальных базальтов - мантийный клин без существенной флюидной составляющей, предполагает заметно более высокие температуры образования расплавов.

Нужно отметить, что моделирование островодужного магматизма с помощью Arc Basalt Simulator v. 5 (Kimura, 2017) показывает, что при содержании воды в перидотите 0,3-0,9 мас. %, при степенях плавления 5-15 % содержание воды в выплавляемых островодужных магмах будет 4-6 мас. %. Эти результаты хорошо согласуются с нашими данными и с результатами из работы (Plank et al., 2013), где среднее содержание воды в островодужных магмах оценивается в 4 ± 2 мас. %.

4.5. Выводы об исходных основных расплавах и их источниках.

На основании полученных результатов по изучению минералов ликвидусной ассоциации и расплавных включений в оливинах из базальтов и андезибазальтов вулкана Меньший Брат кальдеры Медвежья можно сделать следующие выводы:

1. Составы посткальдерных основных пород в Меньший Брат расположены вдоль единого тренда, представленного магнезиальными базальтами – андезибазальтами низкокалиевой, низкоглиноземистой серии.

2. Ликвидусная ассоциация представлена оливином (Fo 85-90 мол. %) и хромистой шпинелью $Cr \# = 0,46-0,60$. Ее кристаллизация проходила в интервале 1090-1220 °С, при фугитивности кислорода $NNO +0,3$ лог. ед.

3. Родоначальные расплавы представляют собой высокомагнезиальные, низко-среднекалиевые, низкоглиноземистые, низкокальциевые основные расплавы. Содержание глинозема не превышало 16,7 мас. %, а содержание магния достигало 13.8 мас. %.

4. Выплавление расплавов происходило из существенно перидотитового источника при температурах на 25-75 °С ниже сухого солидуса перидотита, что составляло 1200-1250 °С, при активном участии отделяющегося от субдуцируемой плиты флюида.

5. Отделение флюида от субдуцирующей плиты под островом Итуруп происходило на глубинах 95-105 км. при температурах порядка 675-770 °С.

6. Исходные базальтовые расплавы являются транспортером углеводородного вещества, вероятно, мантийного происхождения. В составе магматогенного флюида вулкана Меньший Брат доминируют углеводородные соединения, концентрации которых во флюиде достигали 89 мол. %.

Приведённые выше данные о составе и условиях кристаллизации оливина и шпинели позволяют сформулировать первое защищаемое положение.

Ликвидусная ассоциация базальтов вулкана Меньший Брат представлена оливином (Fo₈₅₋₉₀) и хромистой шпинелью (Cr# 0,46-0,60). Её кристаллизация протекала при температуре 1090-1220 °С, фугитивности кислорода на уровне кислородного буфера NNO+0,3 лог. ед. и содержании воды в расплаве до 5 мас. %. Исходные расплавы, из которых кристаллизовались оливин и шпинель имели пикробазальтовый состав.

4.6. Поздняя ассоциация вкрапленников основных пород

Поздняя ассоциация вкрапленников вулкана Меньший Брат представлена вкрапленниками и сростками плагиоклаза и пироксенов.

Плагиоклаз. Состав плагиоклаза варьирует по содержанию анортитового минала от битовнита к анортиту (содержание анортитовой молекулы 77 - 95 мол. %). При этом он обладает сложной ритмичной зональностью по содержанию анортитового компонента. По данным электронной микроскопии в битовните содержание калия достигают 0,1 мас. %. Вкрапленники и микролиты основной массы значительно не отличаются по составу.

Зональное строение крупных вкрапленников плагиоклаза представлено на рисунке (Рис. 35). Во внутреннем строении выделяется две основные зоны – пятнисто-зональная и концентрически-зональная. Пятнистое строение центральной зоны представлено на BSE-изображениях незакономерным расположением светло-серых и темно-серых пятен во внутренних частях вкрапленников. Содержание анортитового минала в темных пятнах 75-80 мол. %, а в светлых 90-95 мол. %. Эта зона богата расплавленными включениями, а также минеральными включениями пироксенов, среди которых преобладает авгит.

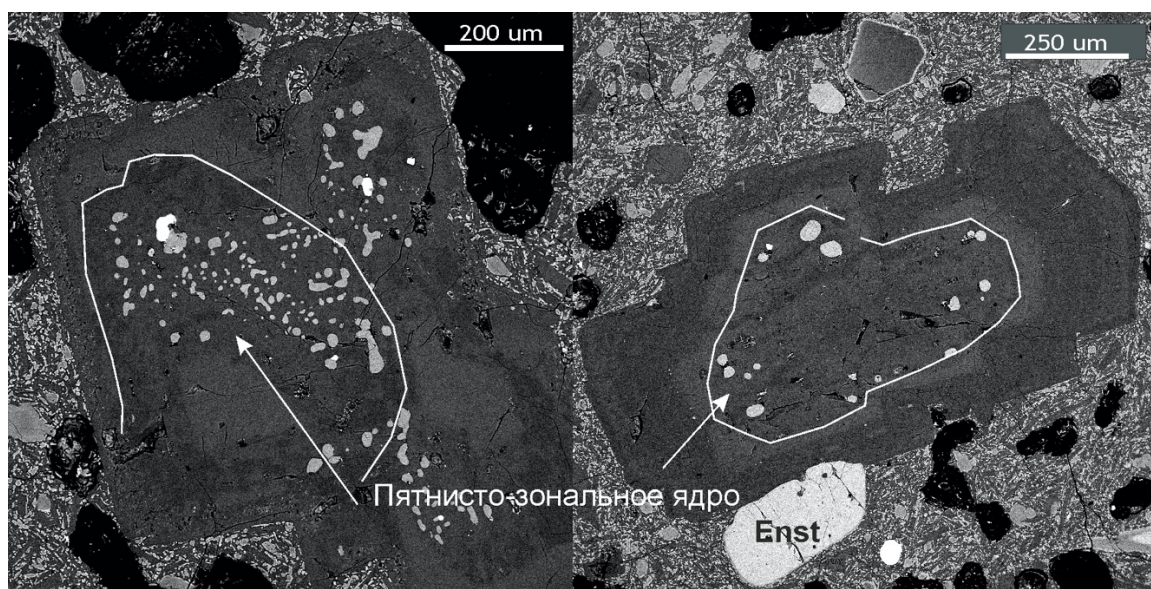


Рис. 35. BSE-изображение вкрапленников плагиоклаза со сложным зональным строением из базальтов вулкана Меньший Брат. Белой линией выделено пятнисто-зональное ядро.

Ca-Mg Пироксен. По химическому составу клинопироксен вкрапленников отвечает высококальциевому авгиту (Woll 33-40 мол. %) с #Mg 0,53-0,60 (Рис. 36, Табл. 14S). По магнезиальности от вкрапленников отличается клинопироксен, образующий каймы вокруг ортопироксена – #Mg 0,77-0,80.

Fe-Mg пироксен. В базальтах обоих кратеров Fe-Mg пироксен представлен энстатитом (гиперстеном с содержанием En 60-62 мол. %) и с содержанием волластонитового минала 3-4 мол. % (Рис. 36, Табл. 15S (Приложение)). Он образует идиоморфные вкрапленники размером до 2 мм коричневого цвета и содержит большое количество включений апатита, магнетита, в меньшей степени плагиоклаза. Энстатит, который обнаружен в виде минеральных включений в плагиоклазе, практически не отличается от вкрапленников (Рис. 36).

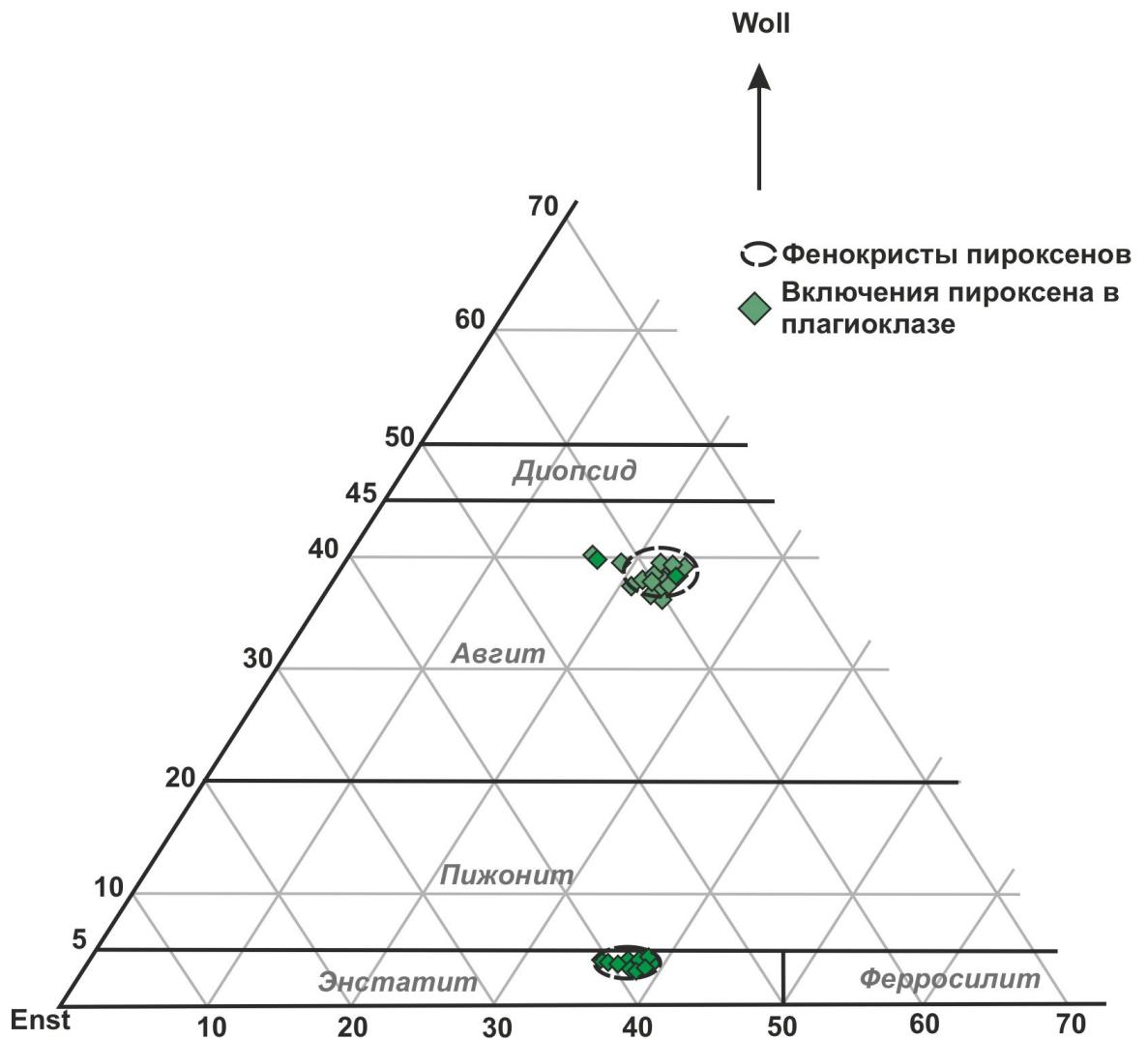


Рис. 36. Состав вкрапленников пироксенов на диаграмме En-Fs-Woll. Номенклатура пироксенов по (Morimoto, 1989).

Оксиды. Оксиды железа встречаются в основной массе, включениях и иногда в сростках с пироксенами и плагиоклазом. В сростках и включениях обычно встречается титаномагнетит и идентифицируется по ярко выраженным треугольным структурам распада (Рис. 37). Гораздо реже встречаются незакономерные сростки магнетита и Ti-магнетита, встреченные в качестве твердофазных включений в клинопироксене.

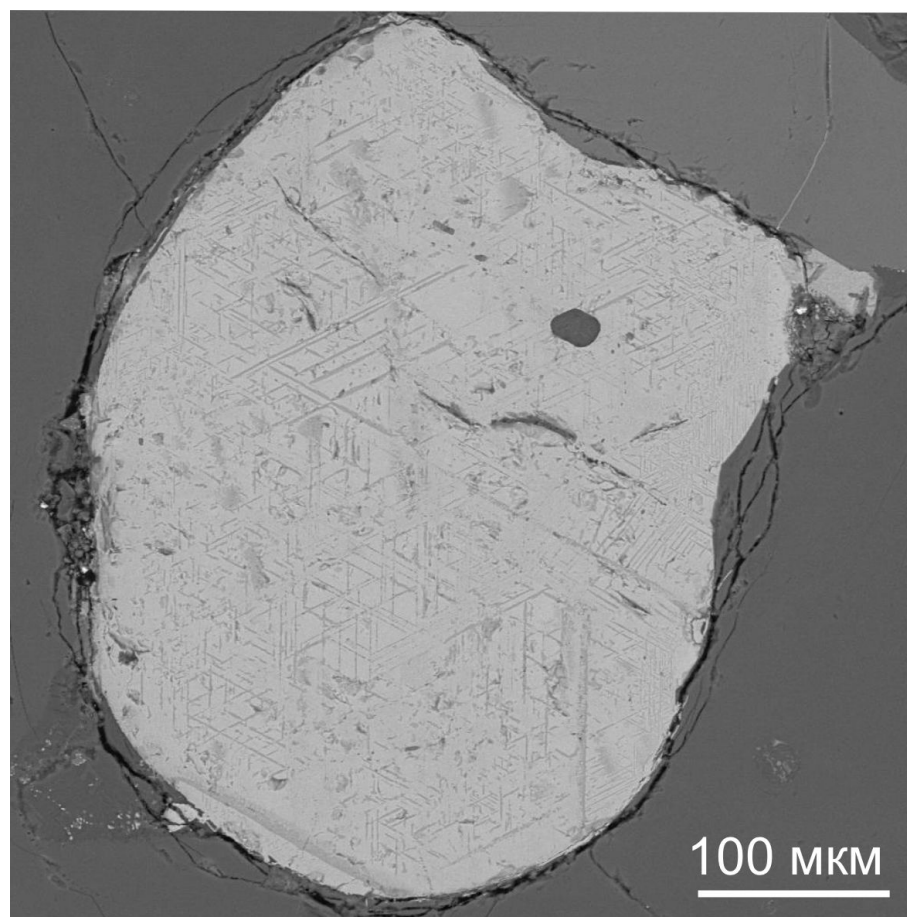


Рис. 37. Твердофазное включение магнетита во вкрапленнике клинопироксена из базальтов вулкана Меньший Брат.

4.6.1. Включения минералообразующей среды в пироксене и плагиоклазе

Включения минералообразующих сред в плагиоклазе

Расплавные включения в плагиоклазе образуют как зональные, так и азональные группы (Рис. 38). Зональные группы обычно расположены согласно зонам роста вкрапленников плагиоклаза. Размер включений сильно варьирует даже внутри группы, в среднем составляет 5 - 60 мкм, достигая иногда 100 мкм. Форма включений разнообразна. В плане они имеют изометричную округлую форму, крупные включения – прямоугольную и овальную.

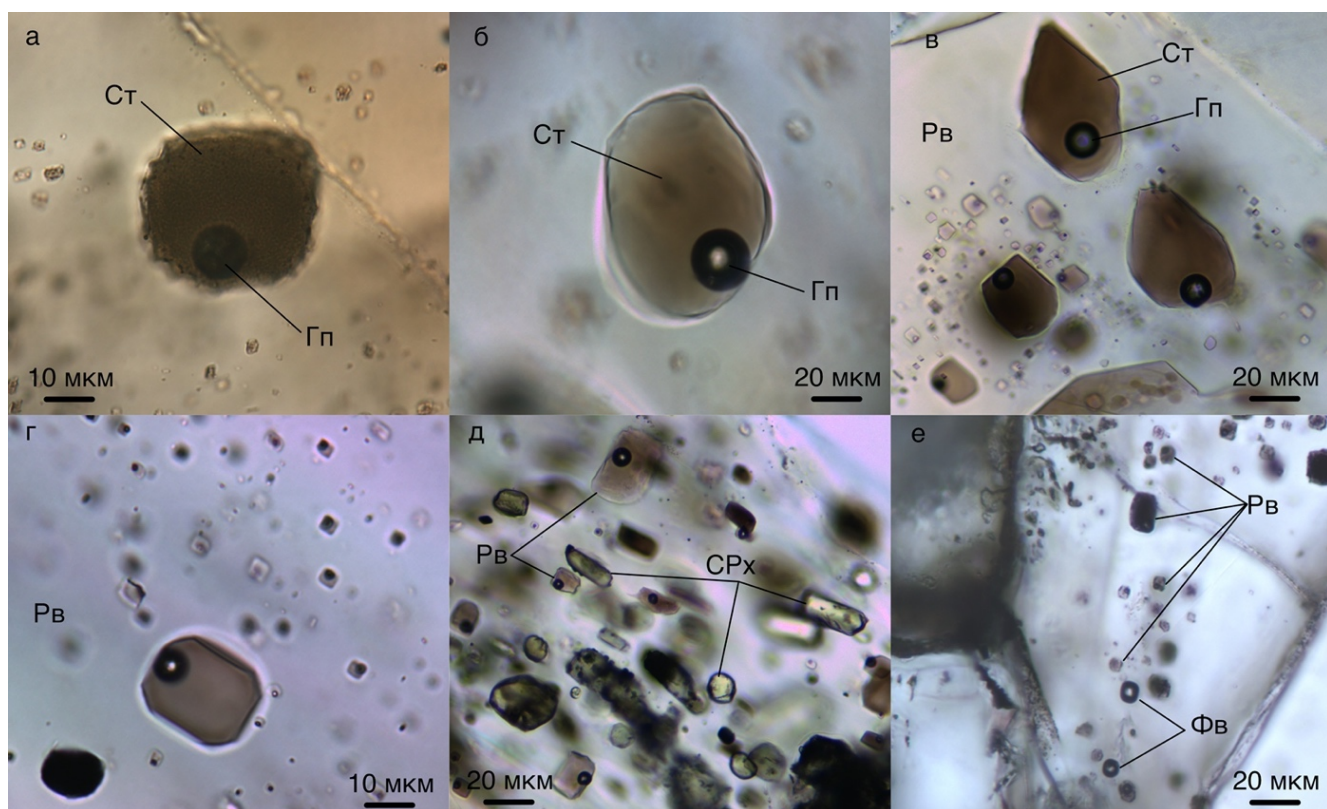


Рис. 38. Включения во вкрапленниках плагиоклаза из базальтов вулкана Меньший Брат: а, б – азональные единичные расплавные включения; в, г – зональные группы расплавных включений по зонам роста; д – зональная группа сингенетичных расплавных и твердофазных включений; е – группа сингенетичных флюидных и расплавных включений.

Большинство включений содержат только природно-закаленное (иногда слабодевитрифицированное) стекло и газовый пузырек. Признаков постзахватных преобразований включений не обнаружено. В качестве твердых фаз в некоторых РВ обнаружены клинопироксен ($\#Mg$ 0,63-0,69) и ортопироксен ($\#Mg$ 0,58-0,6), которые по составу идентичны минеральным включениям в плагиоклазе и вкрапленникам в породе. Такие включения, вероятно, являются аномальными и образовались при гетерогенном захвате, они не использовались при интерпретации результатов.

4.6.2. Химический состав включений минералообразующей среды в плагиоклазе

Состав расплавных включений в плагиоклазе был определен методами рентгеноспектрального микроанализа и представлен в Табл. 13S (Приложение).

Составы стекол расплавных включений в плагиоклазе на TAS диаграмме (Рис. 39) попадают в поле дацитов (67-75 мас. % SiO_2 и до 6 мас. % $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$). Они гораздо более кислые по сравнению с составом стекол расплавных включений в оливине и составом базальтов. Содержания магния в них не превышают 2 мас. %, а железа до 8 мас. % (Рис. 39). Содержания K_2O и Na_2O наоборот значительно выше – от 1 до 2 мас. % и от 2,5 до 4,5 мас. % соответственно (Табл. 13S (Приложение)).

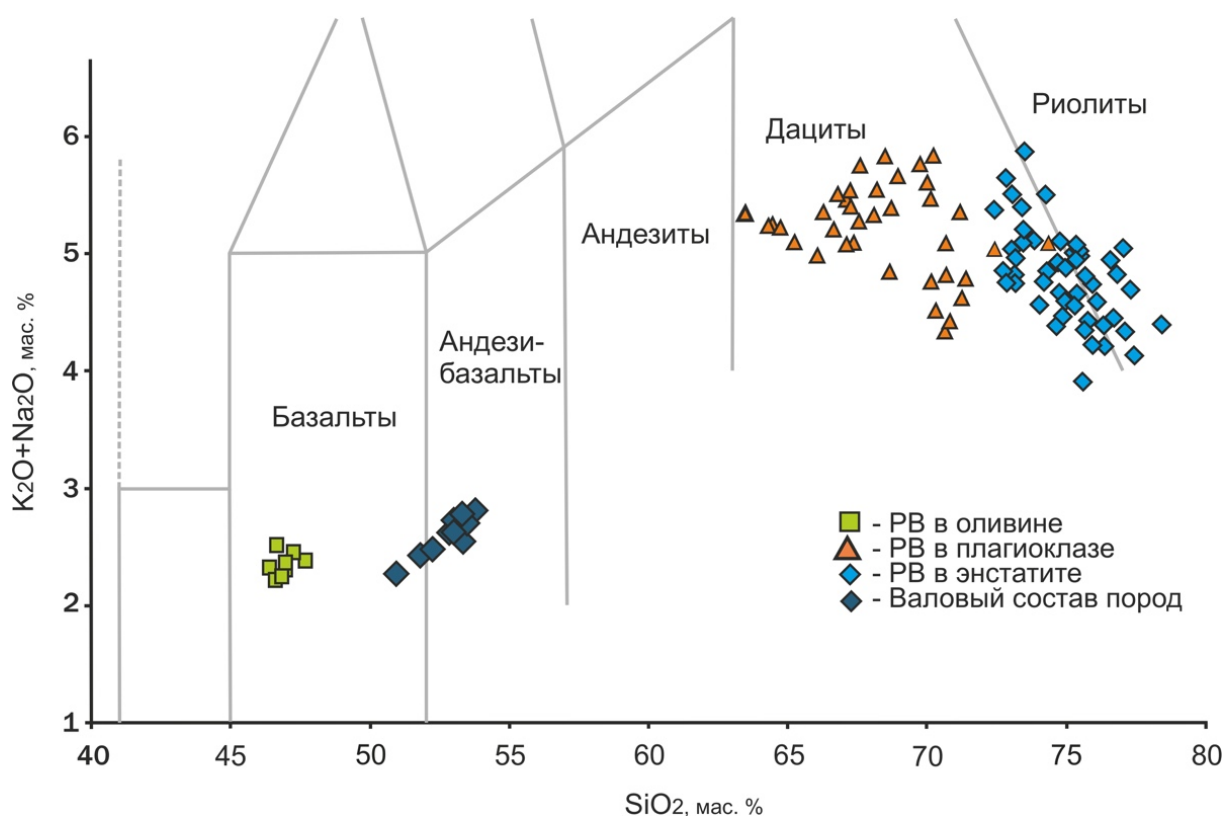


Рис. 39. TAS-диаграмма. Показан состав стекол расплавных включений во вкрапленниках базальтов вулкана Меньший Брат относительно валового состава пород.

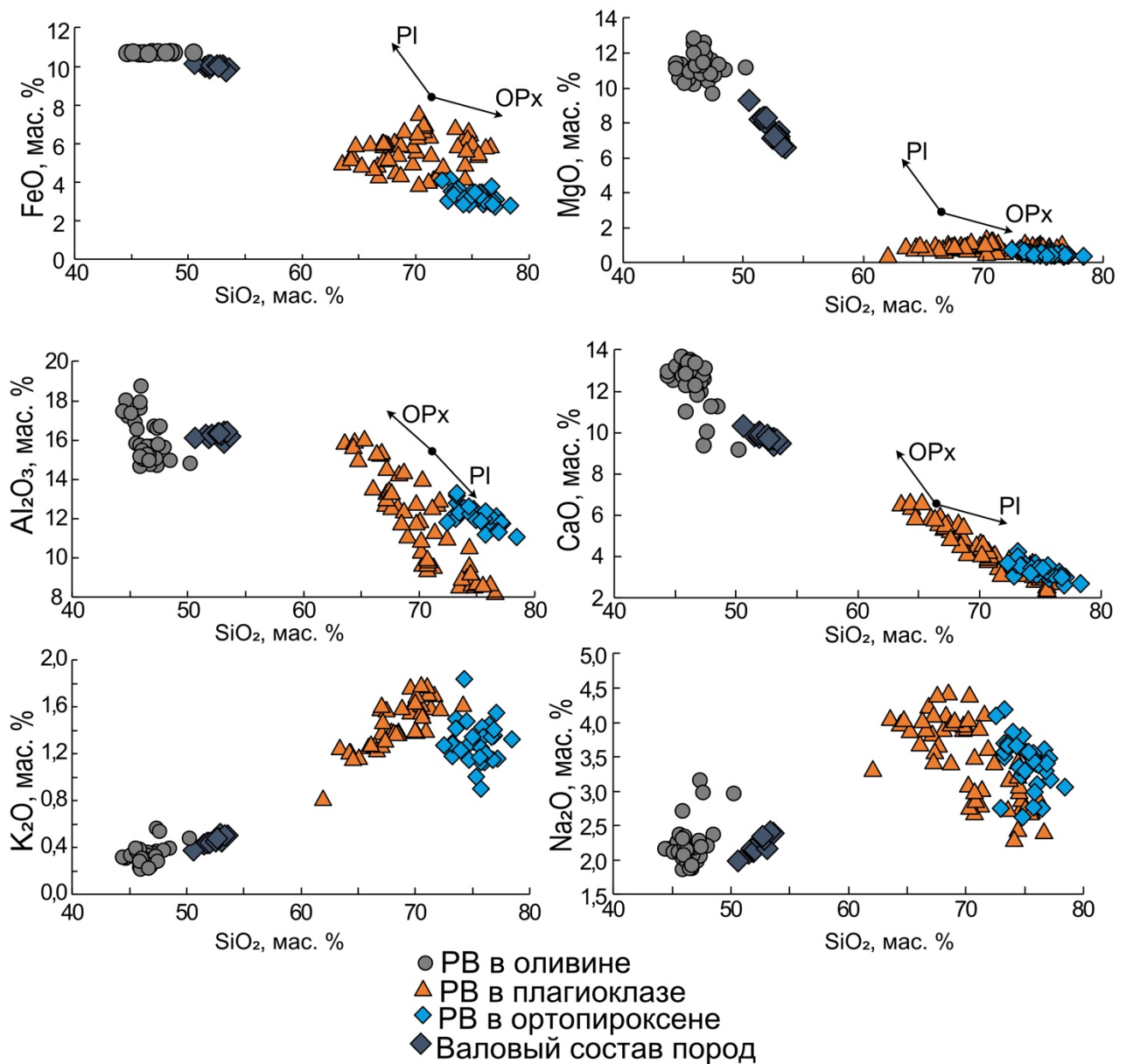


Рис. 40. Состав стекол расплавных включений во вкрапленниках плагиоклаза и энстатита из базальтов вулкана Меньший Брат на дискриминационных диаграммах Харкера. Для сравнения вынесены составы пород и стекол PB в оливине. Стрелками показаны тренды изменения состава расплава при кристаллизации минерала.

Характер распределения редких элементов в стеклах расплавных включений в плагиоклазе на мультиэлементной диаграмме похож на таковой в породах, однако общий уровень концентраций по всем элементам значительно выше (Рис. 41).

Особенно сильно РВ в плагиоклазе обогащены по LILE, Th, Zr, Hf, тяжелым РЗЭ относительно состава пород.

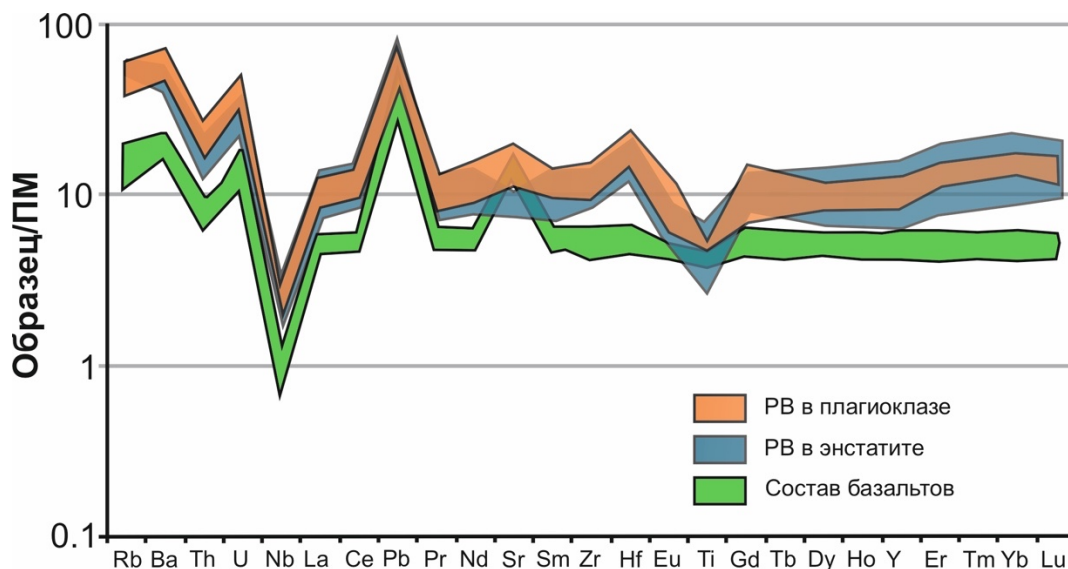


Рис. 41. Распределение редких элементов в стеклах расплавных включений во вкрапленниках плагиоклаза и энстатита из базальтов вулкана Меньший Брат относительно состава базальтов. Состав ПМ по (McDonough, Sun, 1995).

В одном из вкрапленников были обнаружены единичные первичные флюидные включения (Рис. 38е). Эти включения приурочены к зонам роста плагиоклаза и являются сингенетичными расплавленным. По данным Рамановской спектроскопии они содержат малоплотную углекислоту, что свидетельствует как минимум об одном этапе дегазации расплава во время кристаллизации.

4.6.3 Расплавные включения в пироксенах

Первичные расплавные включения были обнаружены во вкрапленниках энстатита. РВ в энстатите расположены в виде зональных и азональных групп (Рис. 42). Размер включений варьирует в пределах 5 - 40 мкм. Включения в целом

имеют округлую и овальную форму, реже они имеют форму негативной огранки минерала хозяина.

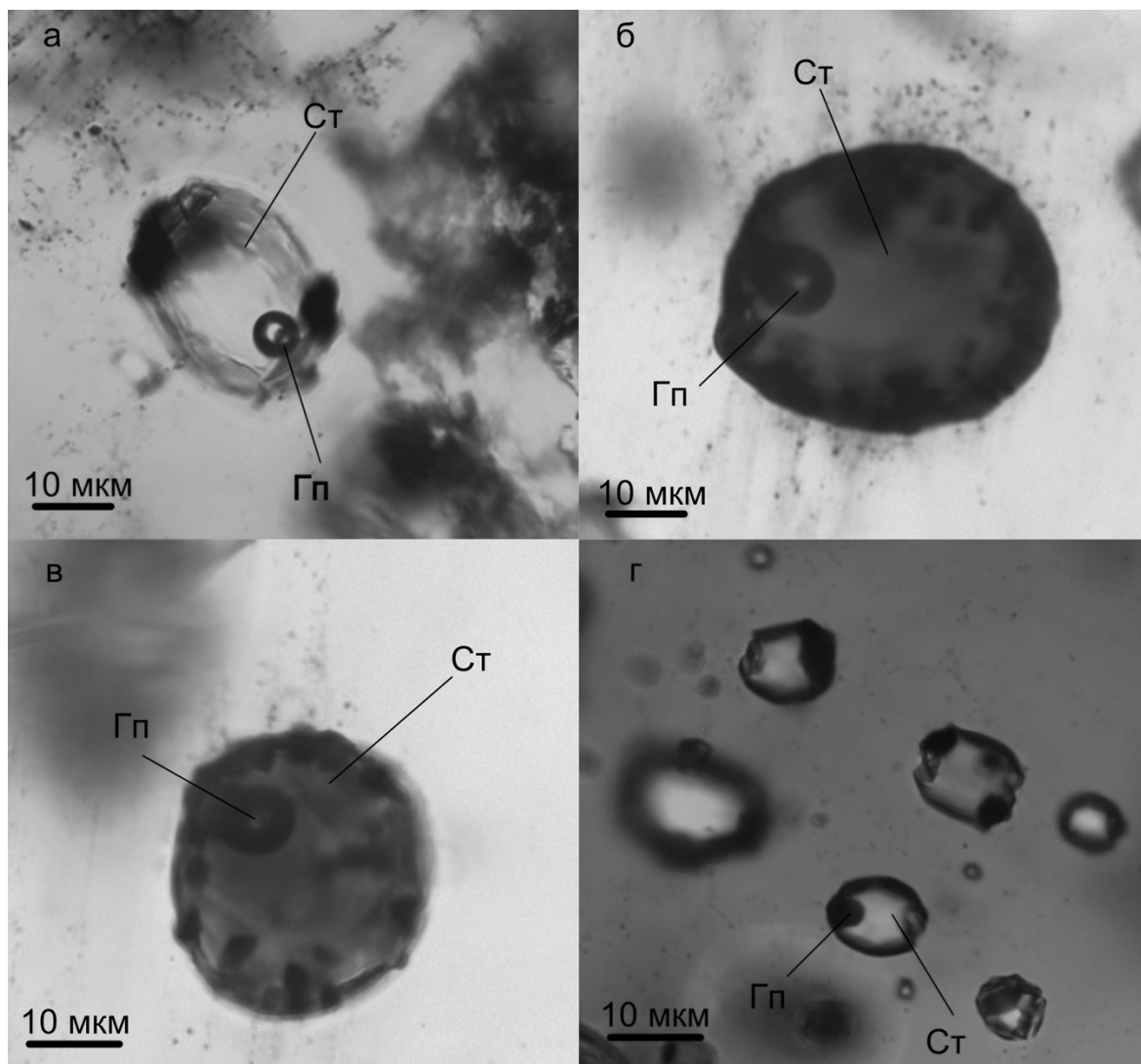


Рис. 42. Расплавные включения во вкрапленниках ортопироксена в базальтах вулкана Меньший Брат.

Расплавные включения в энстатите содержат стекло, газовый пузырек и иногда кристаллические фазы. В качестве кристаллических фаз присутствуют магнетит и плагиоклаз (An_{80}). По составу они соответствуют минералам-вкрапленникам. Расплавные включения с плагиоклазом и магнетитом отражают гетерогенный захват и не были использованы определения состава расплавов.

Авгит практически не содержит расплавных включений. Этот минерал преимущественно содержит твердофазные включения плагиоклаза, по составу отвечающие вкрапленникам плагиоклаза в породе. Повсеместно вкрапленники пироксенов содержат минеральные включения Fe-Ti оксидов, представленных сростками магнетита и титаномагнетита.

4.6.4. Химический состав расплавных включений в пироксенах

Для определения химического состава расплава были использованы только нормальные природнозакаленные стекловатые включения. Состав стекол расплавных включений в энстатите на TAS диаграмме попадает в поля дацитов и риолитов (72-78 мас. % SiO₂ и до 6 мас. % K₂O+Na₂O) (Рис. 39). Это наиболее кислые включения по сравнению с остальными минералами вкрапленниками. Содержания магния в них не превышают 2 мас. %, а железа - 4 мас. %. Содержания K₂O и Na₂O наоборот значительно выше – от 1 до 2 мас. % и от 2,5 до 4,5 мас. % соответственно (Рис. 39, Табл. 16S (Приложение)).

Распределение редких элементов в стеклах расплавных включений в энстатите на мультиэлементной диаграмме близко таковому в стеклах расплавных включений в плагиоклазе. Единственным отличием является ярко проявленный минимум по Eu (Рис. 40), что может быть обусловлено одновременной кристаллизацией вкрапленников плагиоклаза и пироксена.

4.6.5. Летучие компоненты в расплавных включениях в пироксене и плагиоклазе

В одном из вкрапленников плагиоклаза были обнаружены единичные первичные флюидные включения (Рис. 38e). Эти включения приурочены к зонам роста плагиоклаза и являются сингенетичными расплавленным. По данным Рамановской спектроскопии они содержат малоплотную углекислоту, другие газы (азот, метан, вода) не были обнаружены.

Состав газовой фазы включений в плагиоклазе базальтов был определен методом ГХ-МС (Табл. 12S (Приложение)). В газовой фазе обнаружено большое количество соединений – 222. Среди них значительно преобладают углеводороды, доля которых 92,32 отн. %. При преобладании органических соединений, среди последних доминируют карбоновые кислоты (18,38 отн. %) и альдегиды (16,01 отн. %). В подчиненных количествах присутствуют спирты, кетоны и эфиры. Суммарная доля алканов и алкенов углеводородов несколько выше (25,66 отн. %), при этом сохраняется равенство их долей. Несколько выше содержания циклических и гетероциклических углеводородов.

Среди неорганических соединений обнаружены CO_2 (2,31 отн. %), N_2 (1,69 отн. %), вода (1,42 отн. %), а также SO_2 , COS , Xe и Ar .

4.7. Образование поздней ассоциации.

4.7.1. Температура кристаллизации вкрапленников поздней ассоциации

С целью определения температур кристаллизации вкрапленников плагиоклаза проводились высокотемпературные эксперименты по прогреву расплавных включений. При термометрии были использованы только группы, содержащие природно-закаленные стекловатые включения с газовыми пузырьками. Кислые расплавы имеют высокую вязкость, что требует проведения термометрических экспериментов с длительной выдержкой при высоких температурах. Длительные выдержки необходимы для того, чтобы не перегреть расплавное включение и наиболее корректно определить температуру гомогенизации расплавных включений. Гомогенизация кислых РВ в плагиоклазе была достигнута в экспериментах с выдержкой более 10 часов при температурах более 1000 °С при атмосферном давлении. В результате термических экспериментов по прогреву этих включений с длительной выдержкой удалось сгомогенизировать включения размером менее 10 мкм. Более крупные включения не гомогенизируются даже при длительных выдержках - 10 часов и более. Температура гомогенизации расплавных включений в плагиоклазе составляет 1190-1230 °С.

Аномально высокие температуры, полученные в результате термометрии расплавных включений, могут быть обусловлены высокой вязкостью (Рейф, 1990) кислых расплавов. Для проверки данных термометрии был проведен расчет температур равновесия плагиоклаз-расплав по (Putirka, 2008). Данный термометр успешно применяется при определении температур кристаллизации минералов в кислых расплавах и использовался при исследовании кальдерного извержения перешейка Ветровой, о. Итуруп (Smirnov et al., 2018). Расчетные температуры кристаллизации вкрапленников плагиоклаза на основании модели (Putirka, 2008) составляют 895 - 1190 °С (среднее 980 °С). Для дальнейших построений и определения характера эволюции магм используются данные расчетные температуры.

Ортопироксен тоже содержит расплавы кислого состава. Это затрудняет проведение термометрических экспериментов с визуальным контролем фазовых переходов, так как при высокой температуре железо на поверхности пироксенов окисляется и вкрапленники становятся не прозрачными. Добавление в систему термокамеры инертного газа (Ar марки ОСЧ) не решает данную проблему.

Термометрические эксперименты с включениями в ортопироксене не проводились, поэтому оценки температуры их кристаллизации принимались теми же, что и рассчитанные температуры кристаллизации плагиоклаза. Одновременная кристаллизация вкрапленников пироксенов и плагиоклаза обуславливает общие температуры расплавов, при которых они образовались.

4.7.2. Образование поздней ассоциации вкрапленников базальтов

Состав включений в плагиоклазе и пироксене гораздо более кислый, чем состав пород и расплавных включений в оливине. Промежуточных по составу расплавов между ними (андезитового, андезибазальтового) не обнаружено, хотя состав вкрапленников, которые содержат кислые включения, является типичным для базальтов.

Аномально кислый состав стекол включений может быть обусловлен двумя различными процессами. Во-первых, кислые расплавы могут быть дифференциатами исходно базальтовых расплавов. Во-вторых, сильное различие состава включений во вкрапленниках может быть связано со смешением контрастных по составу магм.

Образование кислого расплава в ходе процессов дифференциации исходно базальтового расплава подтвердить сложно (Bachmann, Bergantz, 2006; Gelman et al., 2013). Для того, чтобы расплав накапливал SiO_2 нужно кристаллизовать оксиды и силикаты с содержанием SiO_2 менее 50 мас. %. Такими минералами могут быть оливин (порядка 40 мас. % SiO_2) и оксиды (магнетит, шпинель, титаномагнетит). Если при кристаллизации оксиды будут преобладать над оливином, то кремнезем

в расплаве будет накапливаться довольно быстро. Однако для того, чтобы началась массовая кристаллизация оксидов Fe, Mg, Al, необходимы высокие активности кислорода, которые достигаются при фугитивности кислорода гораздо более высоких, чем те, которые соответствуют кислородному буферу NNO. Даже при фугитивности кислорода, которая соответствует буферу MH, максимально возможные содержания кремнезема в расплаве не превышают ~ 56 мас. %. Это противоречит наблюдаемому составу расплавных включений в пироксенах и плагиоклазе, где наименьшее содержание SiO₂ составляет 67 мас. %.

Наблюдаемая в базальтах ассоциация вкрапленников представляет собой 2 минеральных парагенезиса. Первый, наиболее ранний парагенезис оливина и хромистой шпинели кристаллизовался из базальтового расплава. Второй, более поздний парагенезис плагиоклаза и пироксенов, который кристаллизовался в кислом расплаве.

Состав стекол расплавных включений во вкрапленниках пироксенов и плагиоклаза входит в противоречие с составом минерала-хозяина на основании классических представлений о кристаллизации минералов из расплава при его охлаждении. При содержании MgO в расплаве менее 2 мас. % не возможна массовая кристаллизация ортопироксена с содержанием энстатитовой молекулы 60-62 мол. %. То же касается высококальциевого плагиоклаза и авгита, в большом количестве обнаруженных во вкрапленниках.

Таким образом эволюция исходно мантийного базальтового расплава после кристаллизации ликвидусного парагенезиса заключалась в домешивании ксенокристаллов, которые кристаллизовались в кислом расплаве. Эти расплавы имели более высокий окислительный потенциал, который соответствует кислородному буферу NNO+3, оцененный по составу Fe-Ti оксидов (Табл. 21S (Приложение)) по (Anderson, Lindsley, 1985), в сравнении с расплавом, из которого кристаллизовался оливин (на уровне буфера NNO+0,3). Влияние кислой магмы на минеральный состав базальтов достаточно велико, что выражается в большом

количестве вкрапленников (до 90 %), которые фактически являются ксеногенными для базальтовых потоков вулкана Меньший Брат. Однако это смешение практически не повлияло на валовый состав пород. Состав плагиоклаза, энстатита и авгита является типичным для базальтов, а количество кислого расплава было мало, что не привело к существенному сдвигу состава пород в кислую область. Наиболее вероятный механизм, который объясняет сильное различие составов стекол РВ в различных вкрапленниках — это смешение двух различных по составу магм.

На (Рис. 43) состав базальтов по содержанию кальция отличается от состава базальтового расплава в низкокальциевую область. Снижение содержания кальция обусловлено присутствием вкрапленников оливина, ортопироксена и кислого расплава, в то время как базальтовый расплав и вкрапленники клинопироксена и плагиоклаза содержат больше кальция чем сами породы. Для оценки вклада каждого из этих шести компонентов в измеренный состав пород проведен масс-балансовый расчет.

Результаты этого расчёта количества каждого компонента представлен в Табл. 4. Для расчета взяты усредненные измеренные составы всех вкрапленников и расплавов, а конечным результатом расчета являлся усредненный состав посткальдерных базальтов. Наиболее весомый вклад в состав пород вносят вкрапленники плагиоклаза (33 отн. %) и пироксенов (20 отн. % ортопироксена и 17 отн. % клинопироксена), а также базитовый расплав (18 отн. %). Гораздо меньшую роль играют вкрапленники оливина и кислый расплав, содержания которых в среднем не превышают 8 и 10 отн. % соответственно. Это соответствует и наблюдаемым в шлифах пропорциям основной массы и вкрапленников, среди которых преобладает плагиоклаз, примерно одинаковые количества пироксенов, и наименьшее количество вкрапленников оливина.

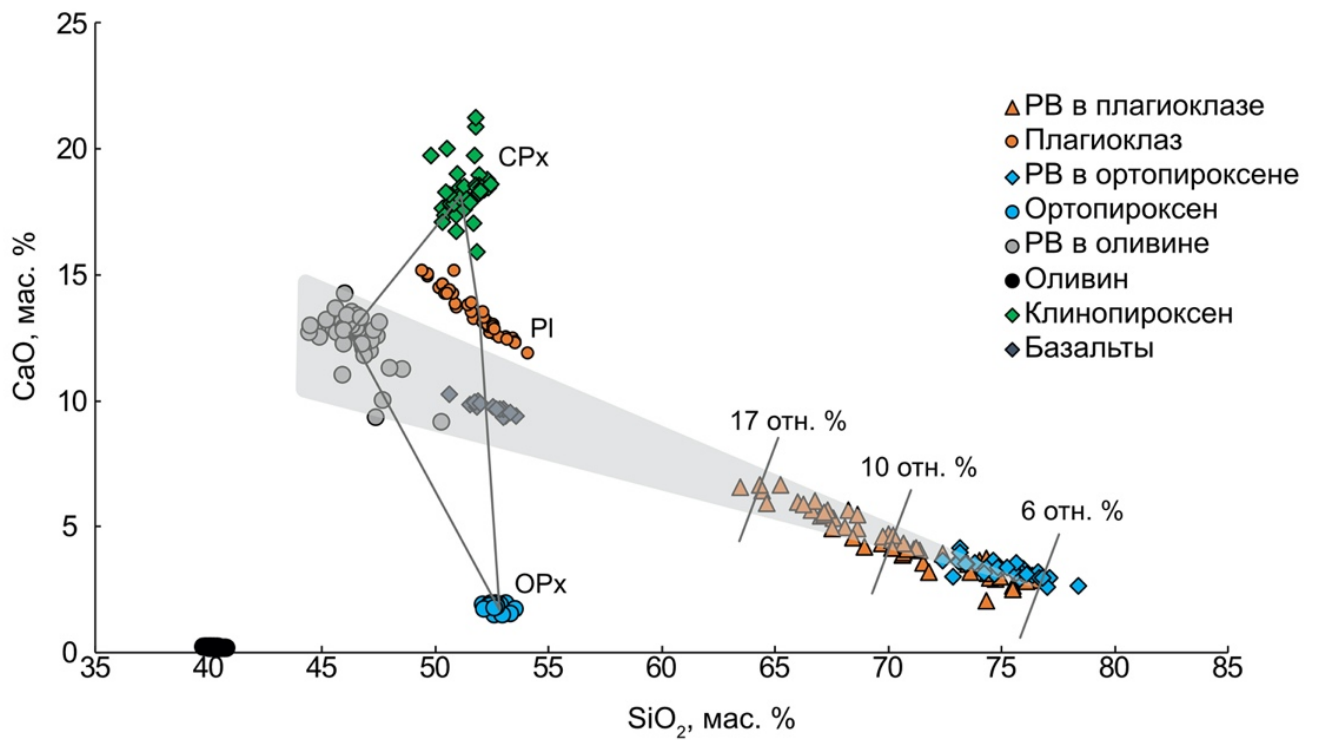


Рис. 43. Содержания CaO в посткальдерных базальтах, минералах-вкрапленниках и расплавах, участвовавших в образовании базальтов вулкана Меньший Брат. Серой линией показан тренд смешения и количественный вклад кислого расплава в содержание кальция в валовом составе базальтов.

Табл. 4. Рассчитанные относительные количества вкрапленников и расплавов, необходимых для образования посткальдерных базальтов вулкана Меньший Брат.

Компонент	CaO	SiO ₂	Относительное количество компонента в составе породы	Относительная концентрация наиболее кислого расплава	Относительная концентрация усредненного расплава	Относительная концентрация наименее кислого расплава
Базальт	9,72	54,50	-	-	-	-
Оливин	0,16	40,23	0,06	8,90	8,63	8,09
РВ в оливине (Базитовый расплав)	12,42	46,51	0,12	18,10	16,47	19,29
Плагиоклаз	13,62	51,57	0,20	31,28	33,33	33,33
Ортопироксен	1,79	52,83	0,12	18,87	20,10	20,10
Клинопироксен	18,30	51,35	0,11	16,71	17,80	17,80
Кислый расплав (Наиболее кислый)	2,65	78,39	0,04	6,13	-	-
Кислый расплав (Усредненный)	4,52	70,11	0,06	-	9,89	-
Кислый расплав (Наименее кислый)	6,58	63,48	0,11	-	-	17,11

Примечание: «-» - не рассчитывалось; оксиды в мас. %, использовались усредненные составы вкрапленников и расплавных включений в оливине.

4.8. Выводы по условиям образования поздней ассоциации вкрапленников

1. Базальты вулкана Меньший Брат содержат 2 парагенезиса минералов-вкрапленников. Наиболее ранним является ликвидусный парагенезис (оливин+шпинель). Второй – более поздний парагенезис, представленный плагиоклазом, энстатитом и авгитом.

2. Кристаллизация плагиоклаза, энстатита и авгита происходила в кислом расплаве при температуре 895-1190 °С при фугитивности кислорода, соответствующей кислородному буферу $NNO+3$ ($\pm 0,5$, 2σ) лог. ед.

3. В составе магматогенного флюида дацитовых магм присутствуют углеводородные соединения, концентрация которых во флюиде достигала 92 отн. %.

4. Базальты вулкана Меньший Брат образованы при смешении двух контрастных по составу магм – основного и кислого состава.

Приведённые выше данные и рассуждения о кристаллизации вкрапленников пироксенов и плагиоклаза из базальтов позволяют сформулировать второе защищаемое положение.

Вкрапленники плагиоклаза, энстатита и авгита являются ксенокристами для базальтов. Они кристаллизовались в кислом расплаве при температуре 895-1190 °С и фугитивности кислорода, соответствующей кислородному буферу $NNO+3$ лог. ед. Эти расплавы соответствуют низкокальциевым дацитам.

Для понимания происхождения ассоциации минералов, кристаллизовавшейся из кислого расплава, необходимо рассмотреть породы синкальдерного этапа формирования кальдеры Медвежья.

Глава 5. Синкальдерные породы

Синкальдерные породы представлены риолитами и андезитами. Они доминируют в строении вулкана Меньший Брат. Эти породы являются более древними, чем базальты, и соответствуют завершению кальдерообразующего этапа развития кальдеры Медвежья. Это риолитовые пемзы, слагающие пемзово-игнимбритовую толщу и андезиты купола вулкана. Андезиты купола вулкана Меньший Брат отнесены к кислым продуктам извержений в силу того, что повсеместно в предыдущих исследованиях эти породы относят к дацитам и указывают на чрезвычайную неоднородность по составу этого купола. В основном эта неоднородность выражается в больших вариациях по содержанию вкрапленников кварца, которое достигает в наиболее кислых разностях пород 20 %. В исследуемых в этой работе образцах купола вулкана Меньший Брат кварц среди вкрапленников отсутствует.

5.1. Петрографическое описание и минеральный состав

Структура андезитов купола порфировая, гломеропорфировая (Рис. 44). Минералы-вкрапленники – плагиоклаз (~65-75%), клинопироксен и ортопироксен (~20-25% и ~10-15% соответственно). Гломеропорфировая структура обусловлена большим количеством сростков этих минералов, равномерно распределенных в основной массе породы. Соотношение вкрапленников и основной массы ~40:60. Структура основной массы породы гиалопилитовая.

Риолиты представлены светло-серыми пемзами со стекловатой основной массой. По своему строению они представляют собой вспененное кислое стекло (Рис. 45), в котором находятся вкрапленники плагиоклаза, клино- и орто-

пироксена и кварца. Соотношение вкрапленников и основной массы ~25:75. Структура риолитов порфировая, гломеропорфировая.

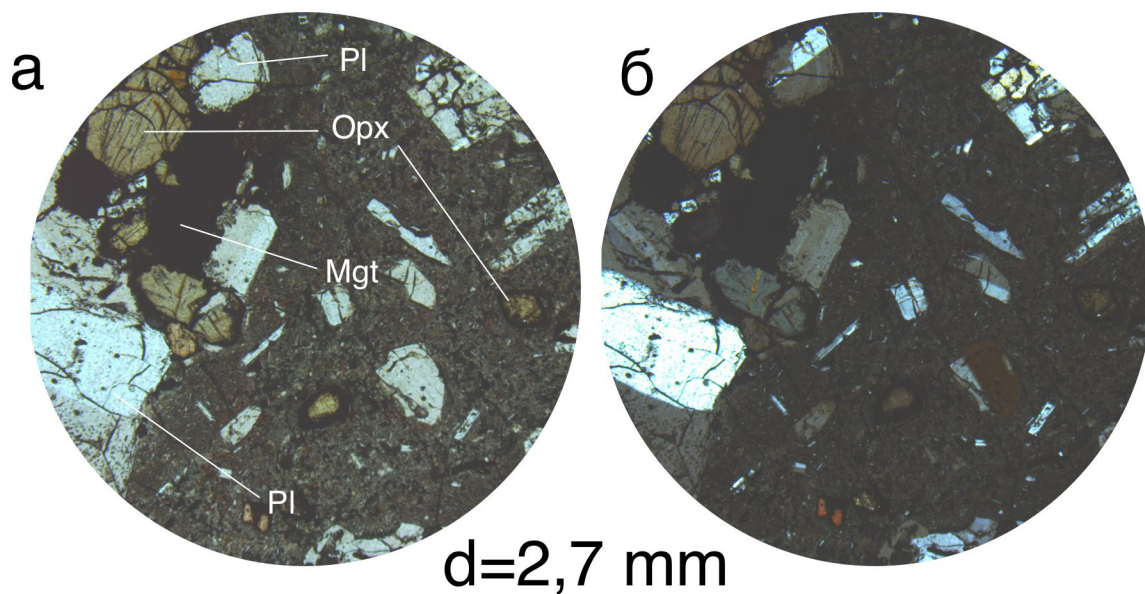


Рис. 44. Фотоснимки шлифа в проходящем свете образца андезита купола вулкана Меньший Брат: а – николи параллельны, б – скрещенные николи.

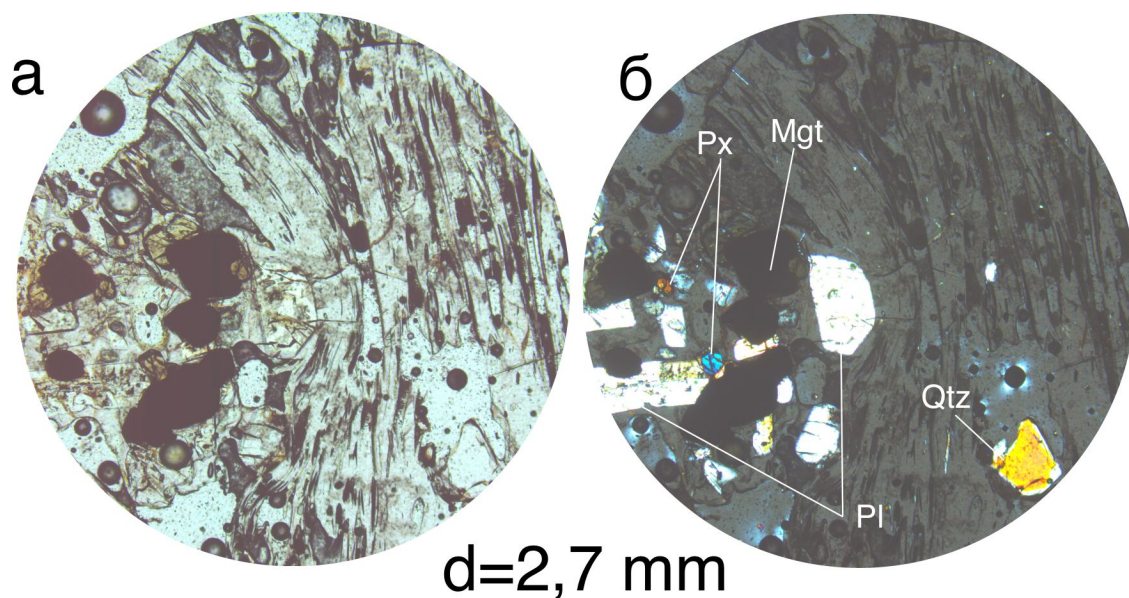


Рис. 45. Фотоснимки шлифа в проходящем свете образца риолитовых пемз вулкана Меньший Брат: а – николи параллельны, б – скрещенные николи.

Плагиоклаз – наиболее распространенный минерал данных пород, представлен идиоморфными прямоугольными кристаллами светло-серого цвета. Он образует крупные вкрапленники размером до 3 мм. Плагиоклаз обладает повсеместно полисинтетическим двойникованием. Вкрапленники плагиоклаза образуют сростки с ортопироксеном и с клинопироксеном, что обуславливает гломеропорфировую структуру пород. Плагиоклаз содержит округлые включения клинопироксена и ортопироксена.

Состав плагиоклаза по содержанию анортитового минала соответствует битовниту (содержание анортитовой молекулы 72-79 мол. %) (Табл. 17S (Приложение)). При этом микролиты плагиоклаза в составе основной массы гораздо более кислые, чем вкрапленники.

Ca-Mg пироксены. Клинопироксен в риолитовых пемзах и андезитах купола образует вкрапленники размером до 2,5 мм зеленовато-желтоватого цвета. Довольно часто он образует сростки с плагиоклазом и ортопироксеном. Иногда клинопироксен содержит магнетит и плагиоклаз в виде кристаллических включений размером до 0,05 мм.

По химическому составу клинопироксен из риолитов отвечает высококальциевому авгиту (Woll 40-42 мол. %) с #Mg 0,68-0,72. Вкрапленники клинопироксена из андезитов купола значимо не отличаются по составу (Woll 40-42 мол. % и #Mg 0,63-0,73) (Табл. 18S (Приложение)).

Fe-Mg пироксен. В риолитовых пемзах Fe-Mg пироксен представлен энстатитом (гиперстеном с содержанием En 59-61 мол. %) с содержанием волластонитового минала 2,7-3,5 мол. % (Рис. 46). Он образует идиоморфные вкрапленники размером до 2-3 мм коричневого цвета и содержит большое количество минеральных включений магнетита, в меньшей степени плагиоклаз.

Вкрапленники ортопироксена из андезитов более магнезиальные, чем в риолитах. Fe-Mg пироксены представлены энстатитом (Содержания En в пределах

61- 68 мол. % и Woll 2,9-4 мол. %) образуют идиоморфные вкрапленники размером до 1 мм коричневого цвета. Энстатит содержит большое количество включений апатита, магнетита, в меньшей степени плагиоклаз. Для ортопироксена характерна прямая зональность, которая характеризуется постепенным снижением содержания магния и повышением содержания железа от центра к периферии кристалла (Табл. 18S (Приложение)).

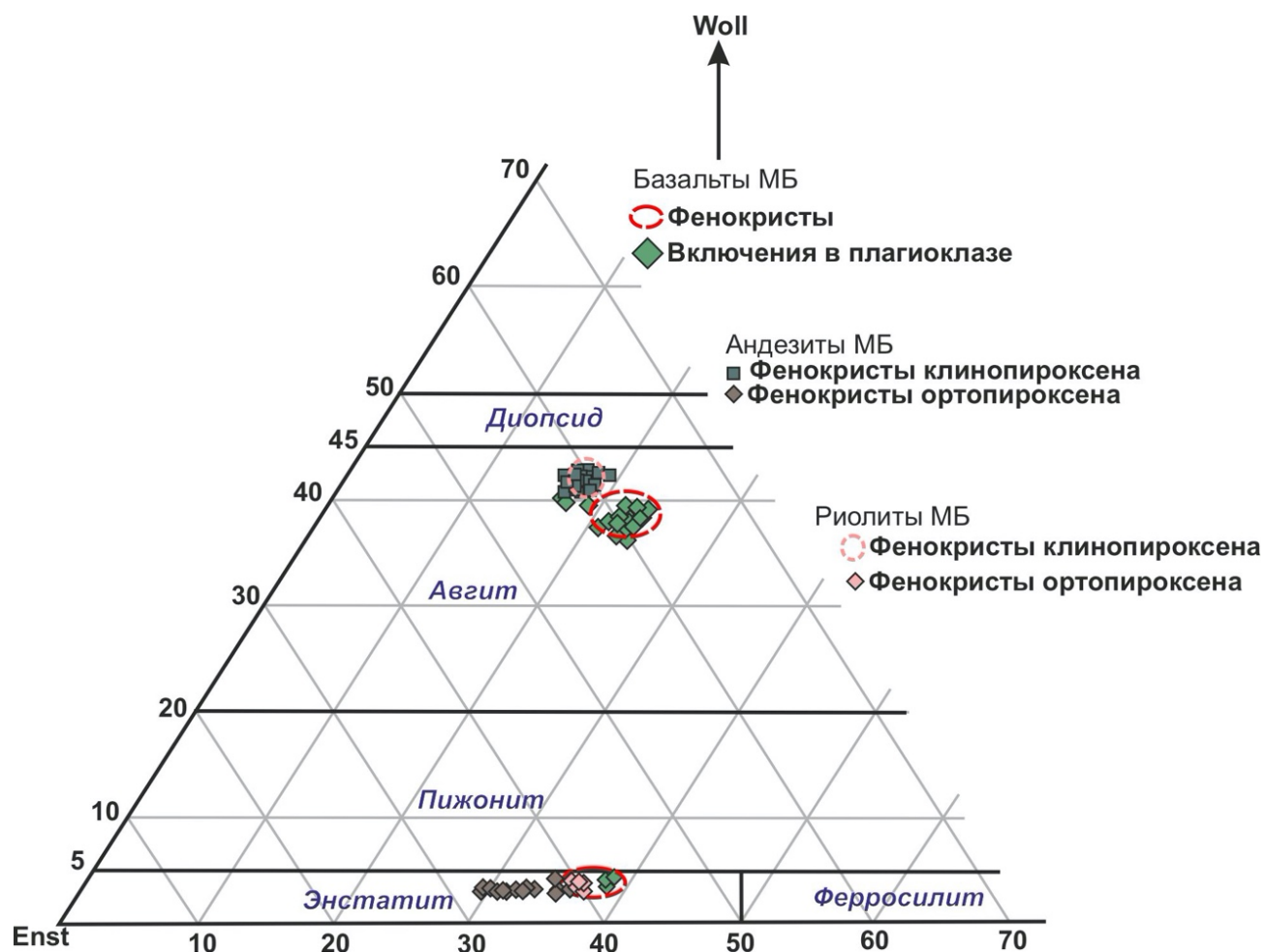


Рис. 46. Состав вкрапленников пироксенов в вулканических породах, слагающих вулкан Меньший Брат (МБ) на диаграмме Enst-Fs-Woll. Разновидности пироксена по (Morimoto, 1989).

Кварц. Вкрапленники кварца встречены только в составе риолитов. Они образуют хорошо ограненные кристаллы размером до 1,5 мм.

5.2. Химический состав пород

Породы, слагающие купол вулкана, по составу относятся к отряду средних вулканических горных пород (60,5-62,8 мас. % SiO_2), к подотряду нормально-щелочных ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 4,1-4,4 мас. %) пород (Петрографический кодекс, 2009). Породы, слагающие пемзово-игнимбритовую толщу относятся к отряду кислых (74,5 мас. % SiO_2), к подотряду низко-щелочных ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 5,4 мас. %). Составы пород представлены на TAS диаграмме (Рис. 47, Табл. 5S (Приложение)).

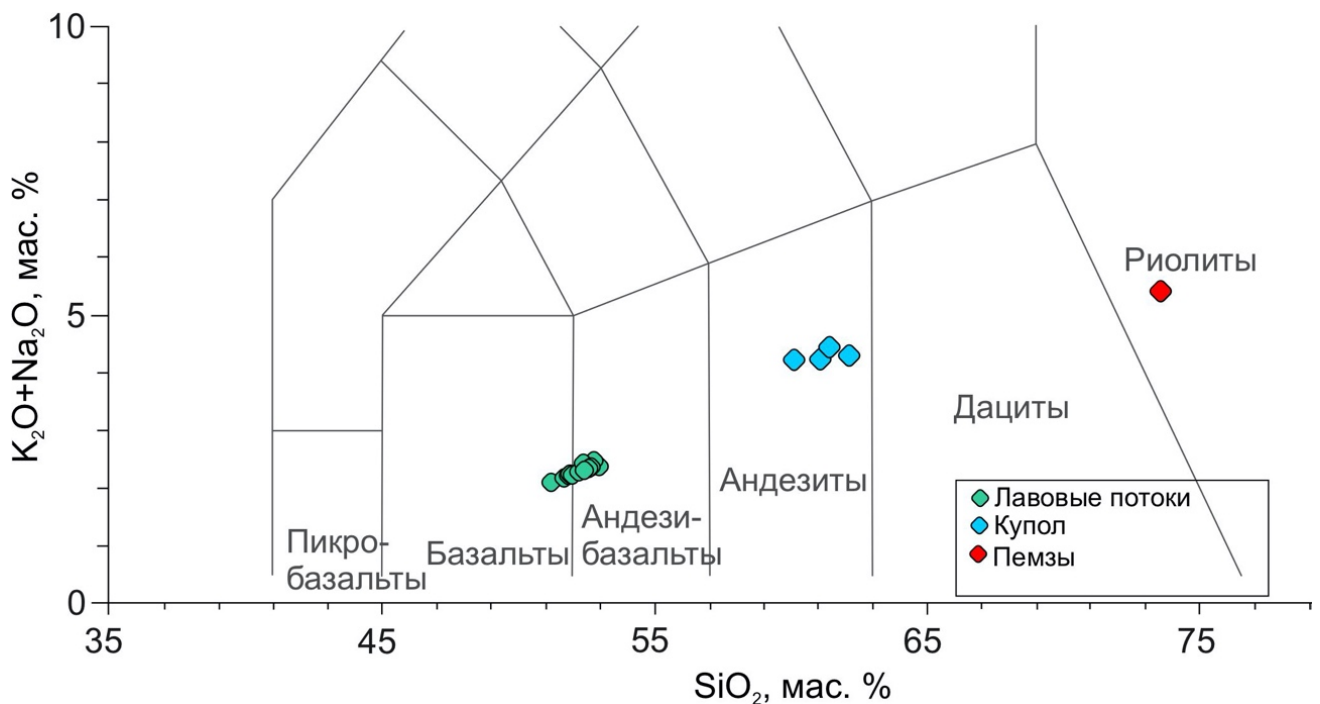


Рис. 47. TAS-диаграмма составов пород вулкана Меньший Брат.

Андезиты купола по содержанию K_2O занимают промежуточное положение между низкокалиевой и умереннокалиевой сериями, тогда как риолитовые пемзы относятся к умереннокалиевой (0,85-1,06 и 1,58 мас. % K_2O соответственно) (Рис. 48). Все эти породы характеризуются натриевым типом щелочности ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 3$ для андезитов и > 1 для риолитов). На диаграмме ANK/ACNK они попадают в метаалюминиевую область (Рис. 49).

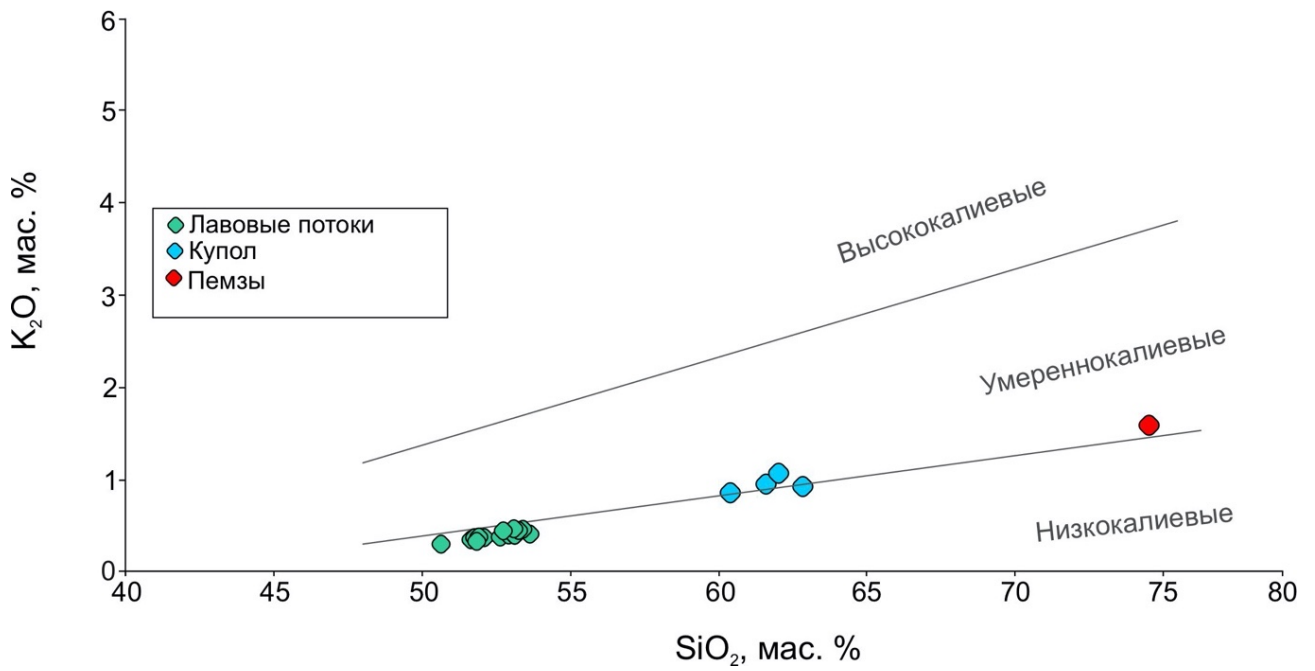


Рис. 48. Диаграмма K_2O-SiO_2 показывающая калиевость пород, слагающих вулкан Меньший Брат.

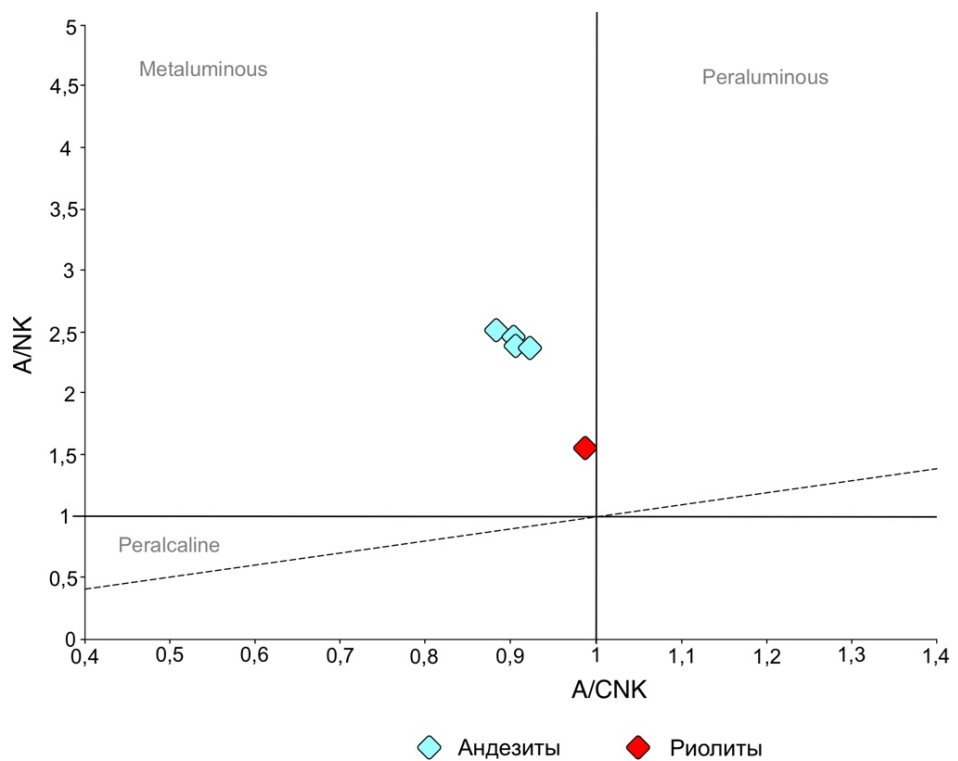


Рис. 49. Составы кислых вулканических пород вулкана Меньший Брат на диаграмме $A/NK-A/CNK$ ($A/NK = Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$; $A/CNK = Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ в мол. %).

5.3. Включения минералообразующих сред

Практически все минералы-вкрапленники пород купола и пемз содержат включения минералообразующих сред. Это первичные природно-закаленные стекловатые расплавные включения.

5.3.1. Расплавные включения в кварце

Вкрапленники кварца из риолитовых пемз содержат большое количество первичных расплавных включений размером до 80-100 мкм. Обычно они содержат частично девитрифицированное стекло и газовый пузырек (Рис. 50а). Включения были прогреты для определения температур гомогенизации расплава и установления температур кристаллизации кварца. Плавление содержимого расплавных включений начинается при 700 °С, с повышением температуры увеличивается доля расплава и уменьшается размер кристаллических фаз. Полная гомогенизация расплава во включениях наблюдается при 960-980 °С, при 1000 °С – заметны признаки перегрева, которые выражаются в искажении формы стенок включения (Рис. 50б).

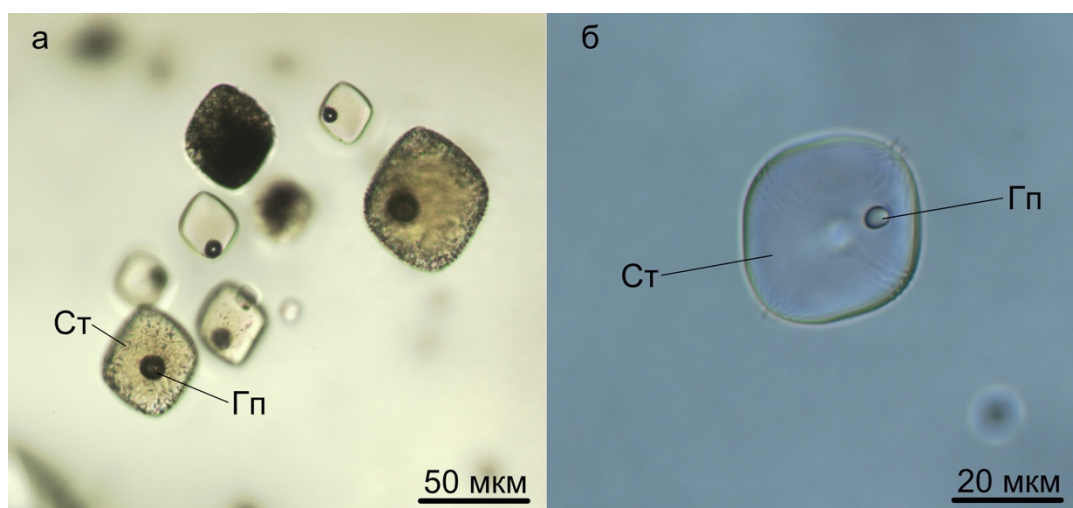


Рис. 50. Первичные расплавные включения во вкрапленниках кварца из риолитовых пемз: а – азональная группа природно-закаленных стекловатых расплавных включений; б – единичное экспериментально закаленное расплавное включение.

Состав расплавных включений был определен методами рентгеноспектрального микроанализа (Табл. 17S, 20S (Приложение)). На TAS-диаграмме (Рис. 51) точки составов стекол РВ в кварце образуют компактную группу в поле риолитов (74-78 мас. % SiO_2 и 6,4-8,2 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$). Они содержат гораздо больше щелочей, чем риолитовые пемзы (Рис. 51, Рис. 54).

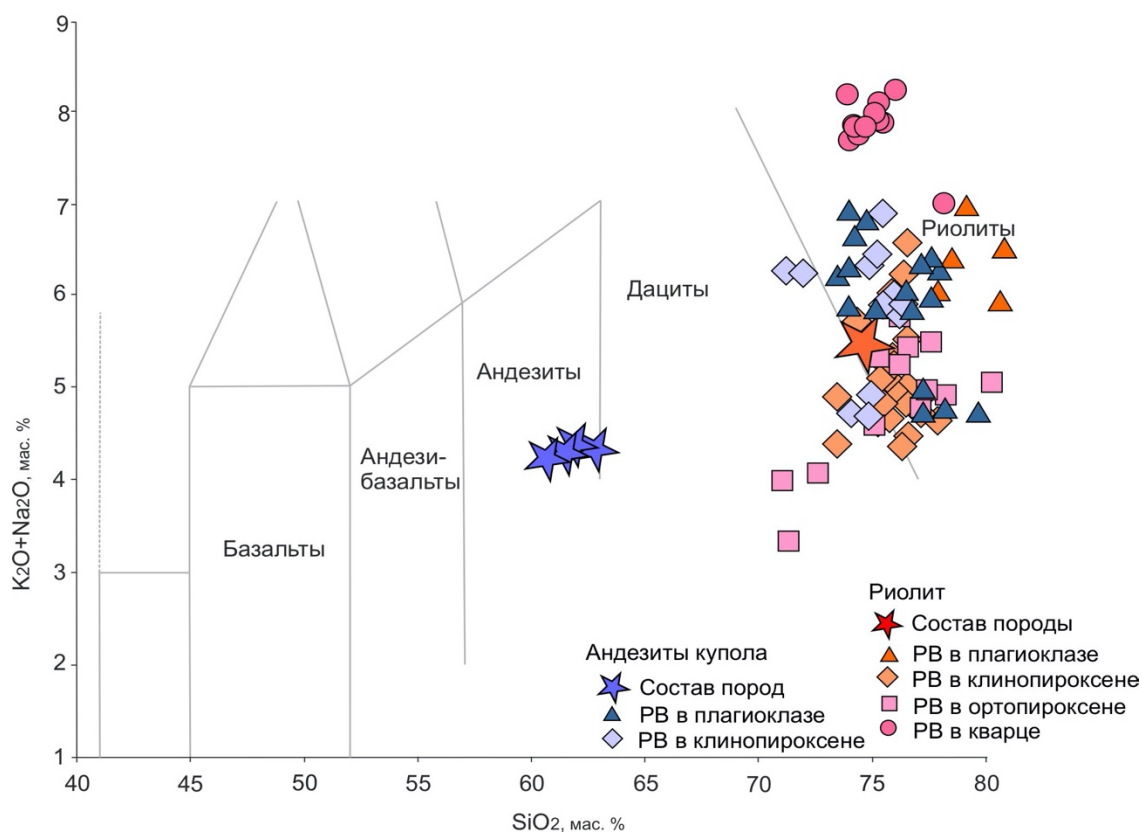


Рис. 51. TAS-диаграмма синкальдерных пород и стекол расплавных включений во вкрапленниках риолитов и андезитов в. Меньший Брат.

5.3.2. Расплавные включения в плагиоклазе

Характеристика расплавных включений во вкрапленниках риолитов (Рис. 52) и андезитов (Рис. 53) приводится совместно. Расплавные включения в плагиоклазе образуют как зональные, так и азональные группы. Зональные группы обычно расположены согласно зонам роста вкрапленников плагиоклаза. Размер

включений сильно варьирует даже внутри группы, в среднем составляет 5 - 60 мкм, достигая иногда 100 мкм. Форма включений разнообразна. В плане они имеют изометричную округлую форму, крупные включения – прямоугольную и овальную.

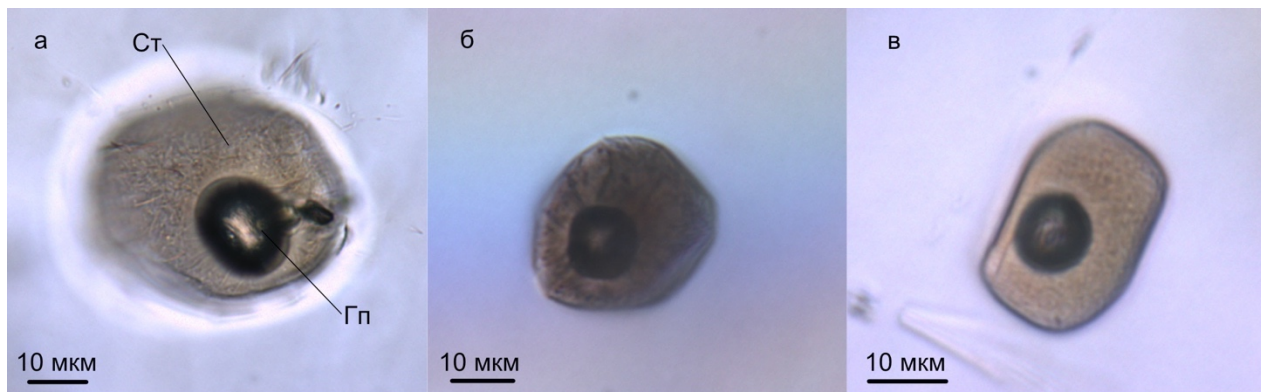


Рис. 52. Единичные, азонально расположенные первичные расплавные включения во вкрапленниках плагиоклаза из риолитовых пемз.

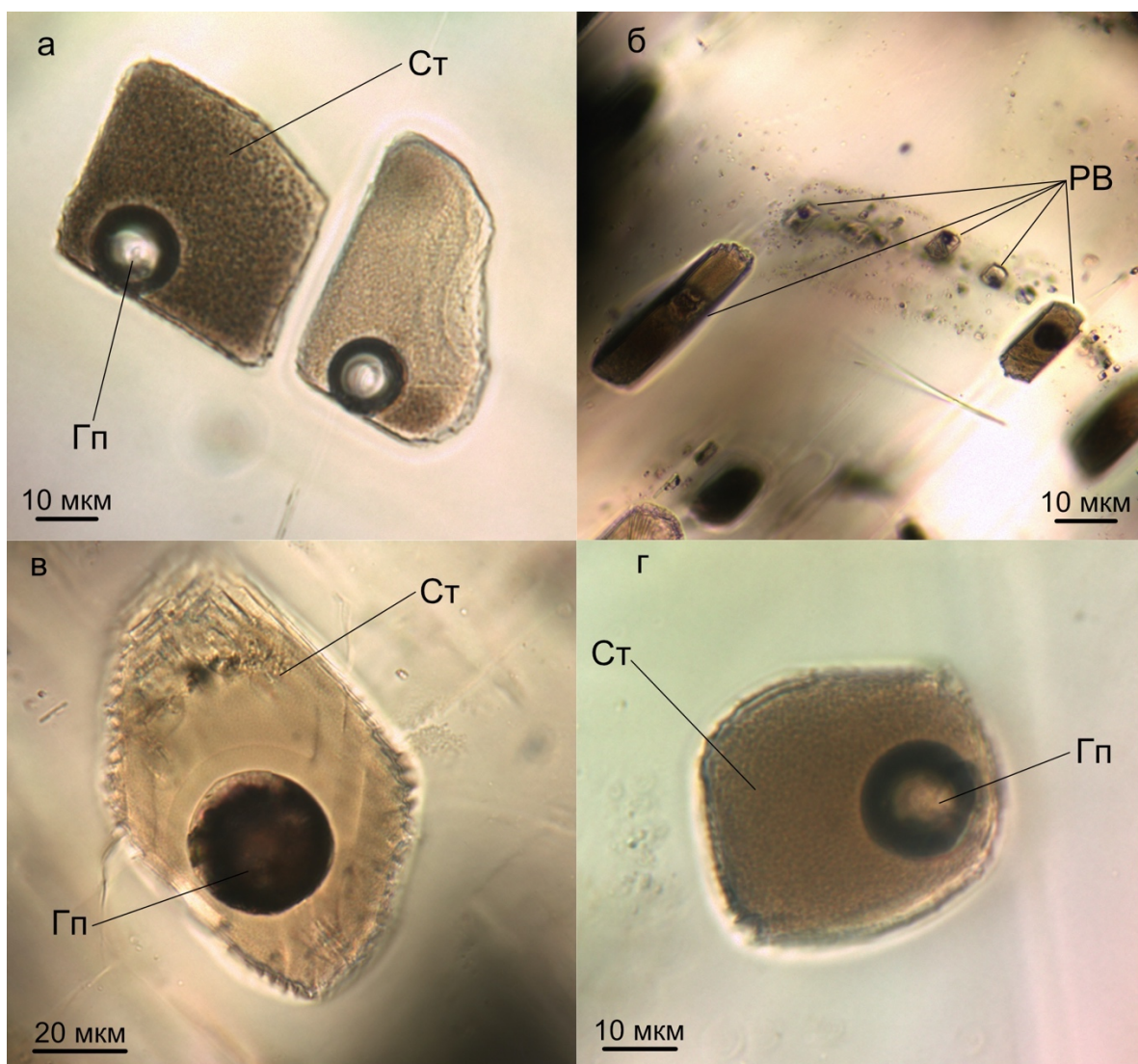


Рис. 53. Первичные расплавные включения во вкрапленниках плагиоклаза из андезитов купола вулкана Меньший Брат: а – азональная группа включений; б – первичные включения по зоне роста; в, г – единичные расплавные включения.

Составы стекол расплавных включений во вкрапленниках плагиоклаза (Рис. 51, Рис. 54) из риолитовых пемз относительно более кислые в сравнении с составом стекол РВ в плагиоклазе из андезитов и в сравнении с составом этих пемз (78-80 мас. % SiO_2 и 5,9-6,5 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (Рис. 51). Состав стекол РВ в плагиоклазе в андезитах гораздо более кислый, чем сами породы и попадает в поле риолитов на TAS-диаграмме с более широкими вариациями по сумме оксидов щелочных элементов (74-80 мас. % SiO_2 и 4,2-6,9 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (Табл. 17S, 20S (Приложение)).

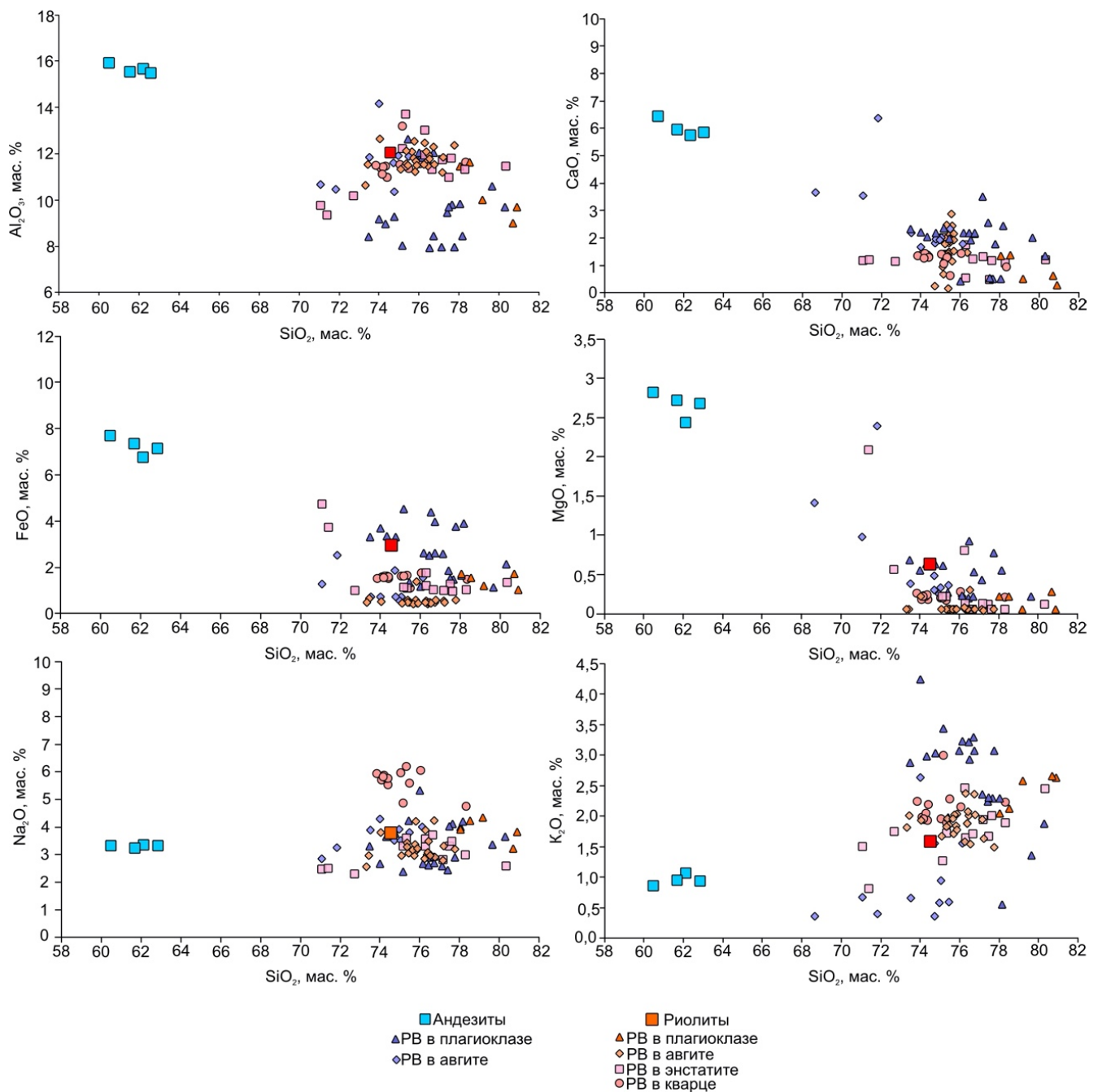


Рис. 54. Состав стекол расплавных включений во вкрапленниках дацитовых пемз и андезитов купола вулкана Меньший Брат.

Температуры кристаллизации плагиоклаза на основе модели минерал-расплав (Putirka, 2008) показывают значения 810 - 1020 °С в андезитах купола и 875 - 920 °С в риолитах.

5.3.3. Расплавные включения в пироксенах

Практически все вкрапленники пироксенов из риолитовых пемз и андезитов купола содержат первичные стекловатые расплавные включения (Рис. 55, Рис. 56, Рис. 57). Они в большинстве случаев имеют округлую форму и размеры до 60 мкм. Однако вкрапленники энстатита из андезитов купола практически не содержат расплавных включений.

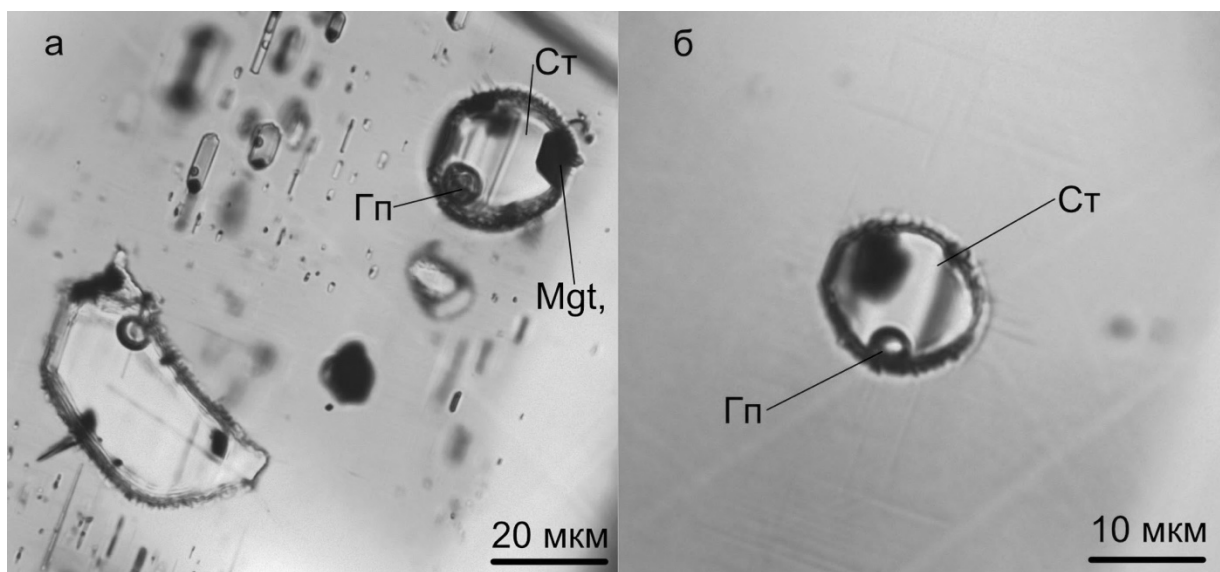


Рис. 55. Первичные природно-закаленные расплавные включения во вкрапленниках ортопироксена из риолитовых пемз: а – зональная группа включений; б – единичное азонально расположенное включение.

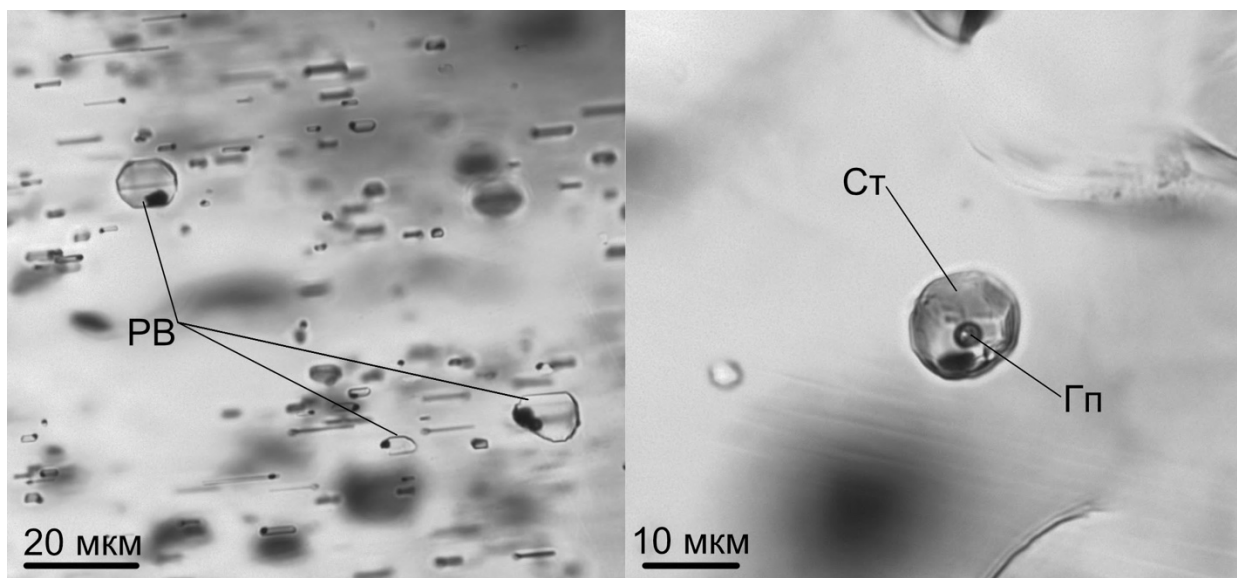


Рис. 56. Первичные природно-закаленные расплавные включения в клинопироксене из риолитвых пемз: а – азональная группа включений; б – единичное расплавное включение.

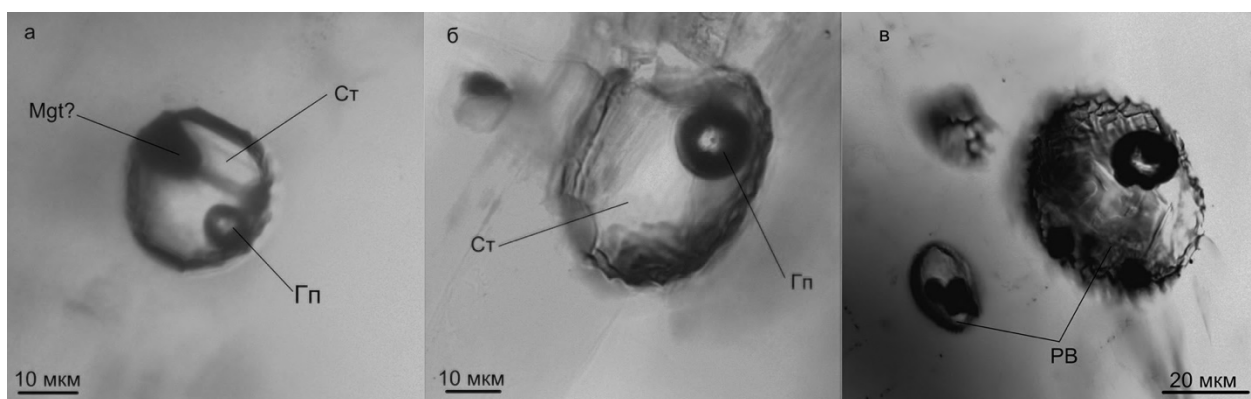


Рис. 57. Первичные природно-закаленные расплавные включения во вкрапленниках клинопироксена из андезитов купола вулкана Меньший Брат: а, б – единичное азонально расположенное включение; в – азональная группа включений.

Состав стекол расплавных включений в пироксенах располагается в поле риолитов с небольшим разбросом в поле дацитов на TAS-диаграмме. Включения в авгите из андезитов аналогичны включениям в авгите из риолитов (68-76 мас. % SiO_2 и 3,5-6,9 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (Табл. 20S (Приложение)). Составы РВ в энстатите

расположены с большим разбросом (71-80 мас. % SiO_2 и 3,3-5,5 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (Рис. 51, Рис. 54).

Температуры кристаллизации вкрапленников пироксенов были определены по модели равновесия клинопироксен-расплав (Putirka, 2008). Оцененные температуры кристаллизации клинопироксена – 880 - 790 °С в риолитах и 1090 - 810 °С в андезитах.

5.3.4. Летучие компоненты во включениях

Содержания воды в стеклах расплавных включений измерялись методом Рамановской спектроскопии. Во включениях в кварце они составляют 2,1-6,6 мас. % (по отношению площадей пиков, см. методы), а в ортопироксене 0,5-5,0 мас. % (по отношению интенсивностей пиков, см. методы) (Табл. 22S (Приложение), Рис. 58).

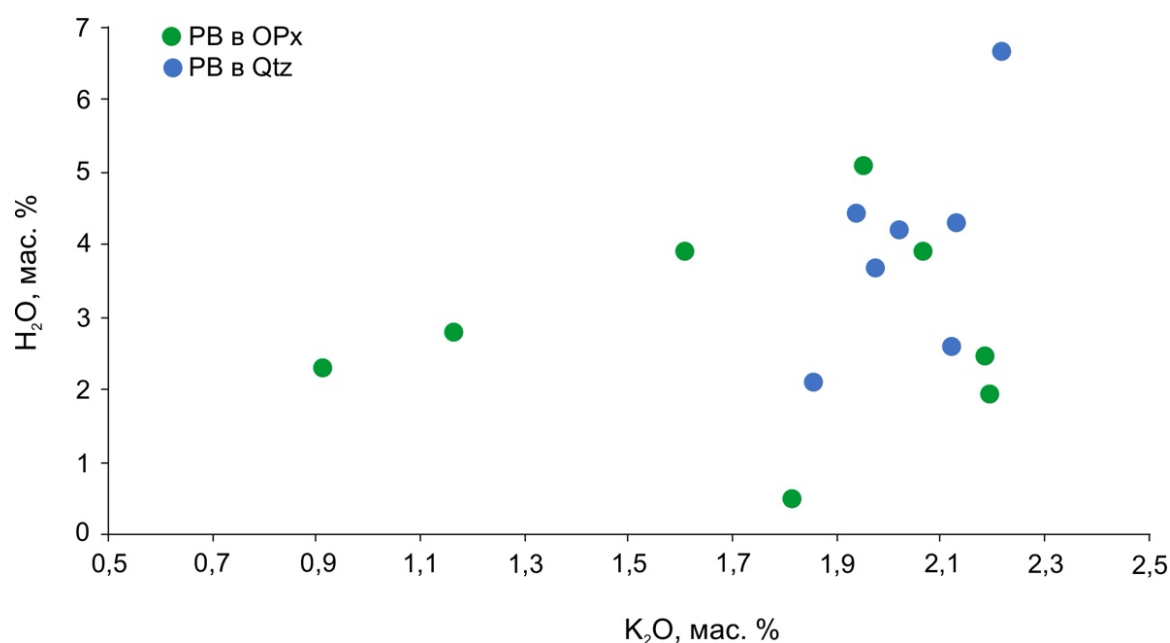


Рис. 58. Измеренные содержания воды в стеклах расплавных включений во вкрапленниках ортопироксена и кварца из риолитовых пемз вулкана Меньший Брат по данным КР-спектроскопии.

Как видно на рисунке (Рис. 58.), с ростом содержания калия в расплаве растет содержание воды.

Результаты ГХ-МС включений в кварце и ортопироксене из риолитов показали присутствие более 240 различных соединений. Их состав значительно отличается от газов, извлеченных из включений во вкрапленниках базальтов (Табл. 12S (Приложение)). Суммарная доля органических соединений варьирует от 80,4 во включениях в клинопироксене до 52,4 во включениях в кварце. Подобно включениям во вкрапленниках базальтов, среди них преобладают кислородсодержащие соединения (66 – 35 отн. %), преимущественно – кетоны и карбоновые кислоты (в сумме около 20 отн. %). Суммарная доля алканов и алкенов во включениях в клинопироксене ниже, чем во включениях в кварце. Меньше всего в составе газов из включений в минералах риолитов циклических (1,38-1,49 отн. %), гетероциклических (0,52-0,65 отн. %), серосодержащих (0,23-0,45 отн. %), азотсодержащих (2,02-4,09 отн. %) и фосфорсодержащих углеводородов (0,05-0,43 отн. %).

Содержания неорганических соединений составляет 19,60 отн. % в клинопироксене, в ортопироксене – 36,81 отн. %, а в кварце – 47,62 отн. %. Столь высокие содержания неорганических соединений достигаются за счет увеличения долей воды (13,24-17,35 отн. %) и углекислоты (1,64-29,11 отн. %). Соединений серы меньше, чем во вкрапленниках из базальтов, сумма $H_2S+CO_2+SO_2+CS_2$ составляет 0,91-2,92 отн. %. Так же присутствуют 1,93-2,66 отн. % N_2 , 0,08-0,11 O_2 , а также Ar и Xe по 0,01-0,04 и 0,07-0,10 отн. % соответственно.

5.4. Происхождение синкальдерных пород

Составы расплавных включений во вкрапленниках кислых пород указывают, что все минералы вкрапленники кристаллизовались в кислом расплаве. Этот расплав по составу соответствует дацит-риолиту. На диаграмме A/NK-A/CNK эти

расплавы расположены вдоль единого тренда от перщелочных к пералюминиевым составам. Включения в авгите из андезитов и в кварце из риолитов располагаются вдоль границы между метаалюминиевыми и пералюминиевым расплавами, но все же в основном тяготеют к метаалюминиевым. Включения в плагиоклазе из риолитов расположены вдоль тренда от метаалюминиевых к пералюминиевым. Включения в авгите и энстатите из риолитов и в плагиоклазе из андезитов располагаются в области пералюминиевых расплавов (Рис. 59).

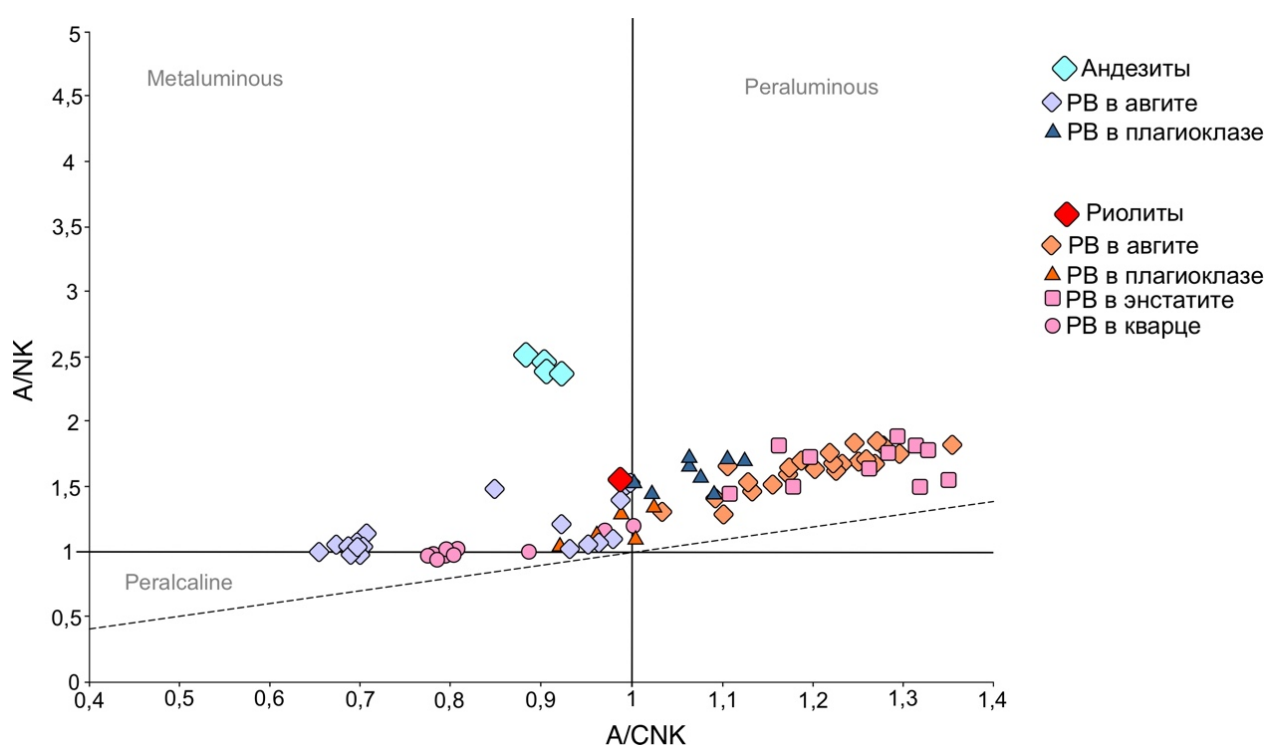


Рис. 59. Составы кислых вулканических пород вулкана Меньший Брат на диаграмме $A/NK-A/CNK$ ($A/NK = Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$; $A/CNK = Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ в мол. %).

Крайне кислым (SiO_2 до 80 мас. %) составом обладают расплавные включения во вкрапленниках кварца и плагиоклаза из риолитовых пемз (Рис. 48). Составы РВ во вкрапленниках гораздо более кислые в сравнении с составом андезитов купола. По сравнению с составом риолитовых пемз, различие не настолько сильное.

5.4.1. Риолитовые пемзы

Состав стекол расплавных включений во вкрапленниках риолитов является типичным для кислых пород. Однако ассоциация вкрапленников плагиоклаза, энстатита и авгита и расплавных включений в них является аналогичной тем, что обнаружены в андезитах купола вулкана и в посткальдерных высокомагнезиальных лавовых потоках вулкана Меньший Брат. Для определения природы вкрапленников клинопироксена был измерен их редкоэлементный состав.

Редкоэлементный состав клинопироксена был определен методом LA ICP MS и представлен в Табл. 19S (Приложение). Распределение редких и редкоземельных элементов в клинопироксенах купола Меньшого Брата показано на (Рис. 60) и в сравнении с клинопироксеном базальтов и андезитов Японской островной дуги и Анд, изучаемые нами вкрапленники имеют в целом похожие спектры распределения редких элементов на спайдер-диаграмме. Принципиальным отличием является поведение тяжелых РЗЭ, имеющее плоское распределение в отличие от состава пироксенов, кристаллизовавшихся из базальтового расплава в других зонах субдукции. При этом состав клинопироксенов из всех пород вулкана Меньший Брат значительно не отличаются друг от друга.

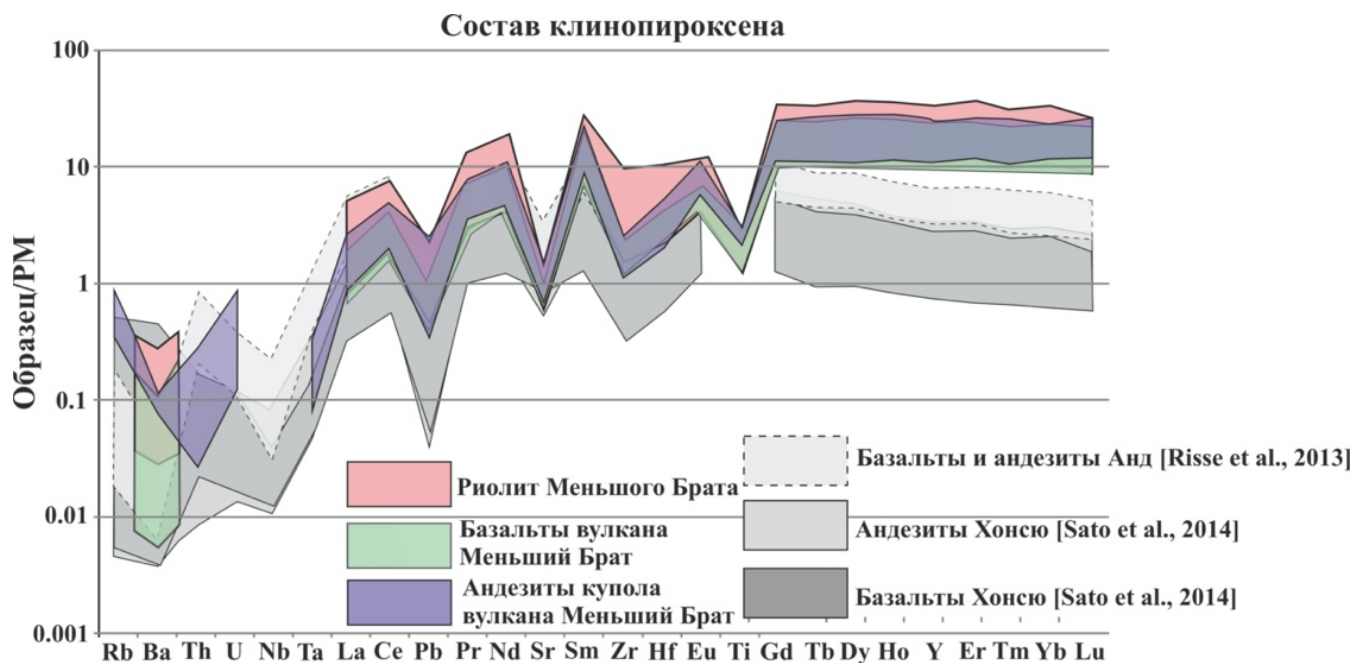


Рис. 60. Распределение редкоземельных элементов в составе вкрапленников авгита из пород, слагающих вулкан Маленький Брат. Серым цветом показаны составы клинопироксена из базальтов и андезитов других зон субдукции.

В то же время, на спектрах РЗЭ, нормированных на хондрит (Mc Donough, Sun, 1995), наблюдаются отчетливые различия (Рис. 61). Распределение лантаноидов в клинопироксенах из андезитов купола вулкана Маленький Брат соответствует таковому в кинопироксенах из риолитов и базальтов. На это указывают более высокие значения тяжелых редкоземельных элементов (от Dy до Lu) и отчетливо проявленный минимум по европию.

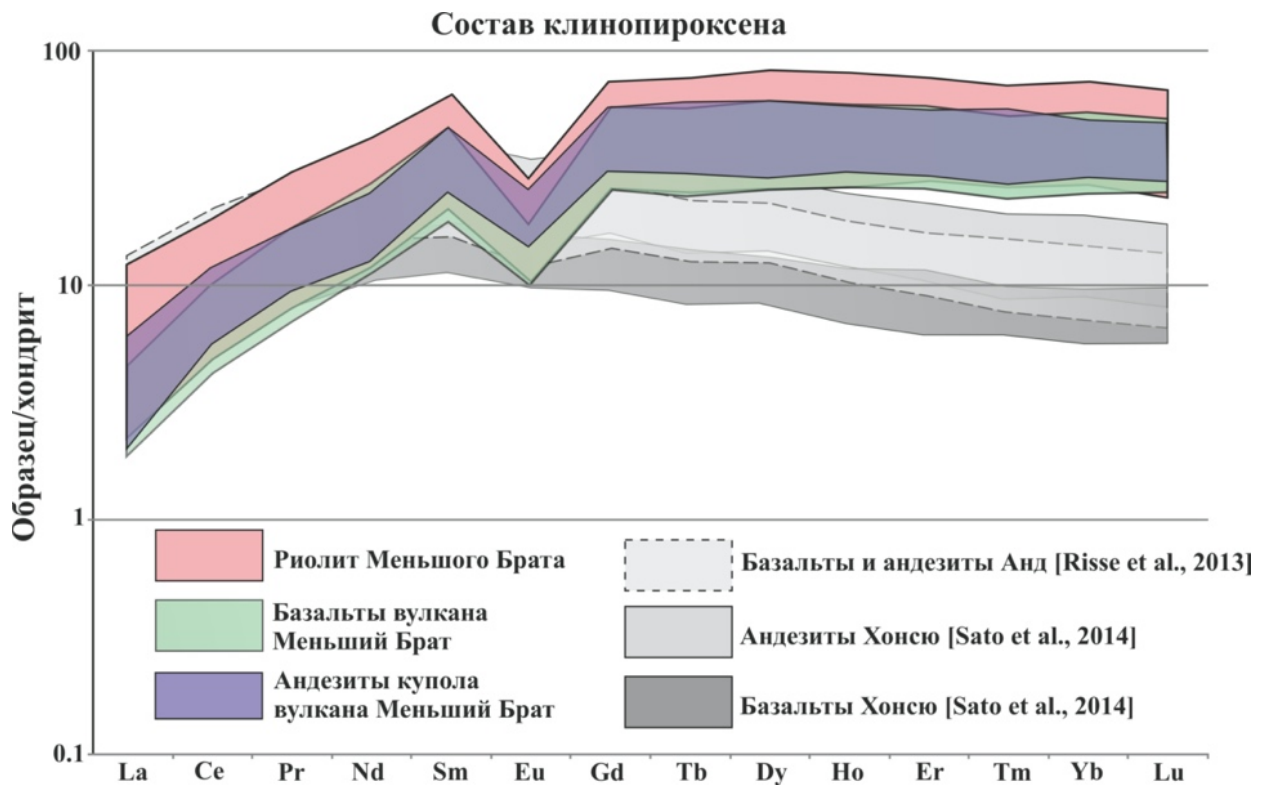


Рис. 61. Распределение редкоземельных элементов в составе вкрапленников авгита из пород, слагающих вулкан Меньший Брат. Серым цветом показаны составы клинопироксена из базальтов и андезитов других зон субдукции.

Это позволяет предположить, что ассоциация вкрапленников риолитов кальдеры Медвежья представлена двумя парагенезисами минералов. Наиболее ранним является парагенезис вкрапленников $Pl+Sp+Or$, который по составу аналогичен вкрапленникам посткальдерных базальтов. Кварц и включения в нем относятся к другому парагенезису. Кварц, обнаруженный только в риолитах, является минералом, образованным при эволюции исходно кислого расплава в малоглубинной камере.

Так как образование настолько кислого расплава (SiO_2 до 81 мас. %) невозможно объяснить процессами дифференциации и фракционной кристаллизации базальтового расплава, то для этого предлагается механизм частичного плавления коровых островодужных субстратов.

Экспериментальные данные (Beard, Lofgren, 1991) показывают, что при дегидратационном плавлении метабазитов в интервале температур 900-1000 °С и давлений 1-7 кбар образуется кислый расплав и ассоциация минералов, представленная основным плагиоклазом и высокомагнезиальными пироксенами. Также было показано, что состав плавящегося метабазитового протолита практически не влияет на состав новообразованных минералов и на их процентное соотношение. Соотношение минералов в этих экспериментах составляет в целом 50+35+15 плагиоклаза, клинопироксена и ортопироксена соответственно при давлении в 1 кбар. Степень плавления достигала 40 %, состав полученного расплава соответствовал плагиограниту (Beard, Lofgren, 1991; Туркина, 2000).

На основе экспериментальных данных можно заключить, что плагиоклаз и пироксены образованы при перитектическом плавлении. В таком случае ассоциация вкрапленников плагиоклаз + клинопироксен + ортопироксен является перитектическим парагенезисом, так как термин «реститовый парагенезис» не отражает процесс образования в кислой магме минералов, состав которых характерен для основных пород.

С целью определения происхождения кислой магмы был рассчитан нормативный минеральный состав дацит-риолитовых включений. Фигуративные точки нормативных минеральных составов на диаграмме полевых шпатов (Рис. 62) располагаются в основном в поле тоналитов с небольшим разбросом в поля гранодиоритов и трондьемитов, что по химическому составу соответствует плагиогранитам.

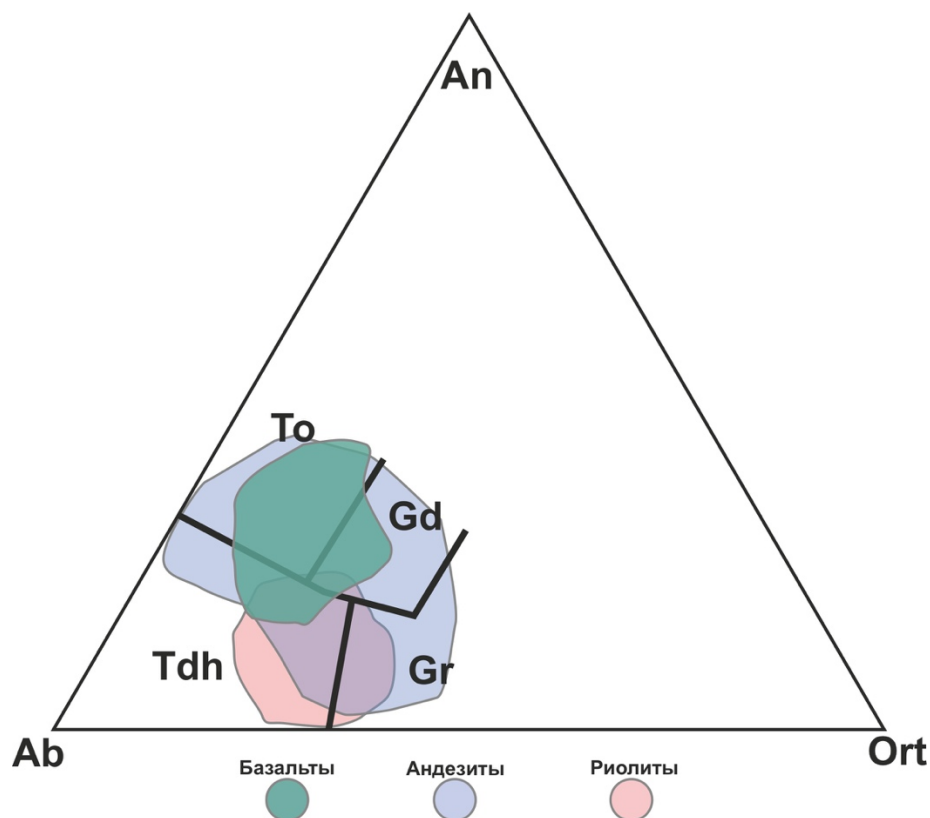


Рис. 62. Диаграмма нормативных полевых шпатов. Полями показаны нормативные минеральные составы стекол расплавных включений кислого состава во вкрапленниках пород, слагающих вулкан Меньший Брат.

На основании расчетов равновесных температур, с использованием экспериментальных данных (Beard, Lofgren, 1991), дацит-риолитовая магма могла быть образована при дегидратационном плавлении метабазитов островодужной коры в интервале давлений 1-3 кбар. Она представлена плагиогранитным расплавом и перитектическим парагенезисом основного плагиоклаза, авгита и энстатита. Образование этого парагенезиса происходило в интервале температур 895-1190 °С. Источником тепла, под действием которого происходило плавление коры, могла являться базальтовая магма, температура которой достигала 1220 °С. Постепенно дегазирующий базальтовый расплав также мог являться одним из источников летучих компонентов, накопление которых в кислой магме могло привести к крупному кальдерообразующему извержению.

Как видно на рисунке (Рис. 58) при кристаллизации кварца с ростом содержания калия в расплаве растет содержание воды. Эта тенденция отчетливо видна во включениях в кварце, где максимальные содержания воды достигают 6,6 мас. %. Так как кварц является наиболее поздним минералом, кристаллизовавшимся непосредственно из кислого расплава, то, наиболее вероятно, перед кальдерообразующим извержением кислый расплав в очаге имел значительные количества воды, дегазация которой и могла привести к крупному извержению. Это хорошо согласуется с современными представлениями об образовании крупных очагов кислых магм при плавлении коровых субстратов под действием тепла горячих базитовых магм.

5.4.2. Андезиты купола

Составы минералов-вкрапленников из андезитов и стекол расплавных включений в них сильно похож на состав минералов и включений во вкрапленниках базальтов. Стекла расплавных включений в пироксенах из пород купола немного более кислые, чем в базальтах, однако и состав самих вкрапленников авгита и энстатита более магнезиальный. Как и в случае посткальдерных базальтов, в андезитах купола невозможно обосновать состав минералов и РВ процессами дифференциации исходно базальтового расплава. Ассоциация вкрапленников $P1+CPx+OPx$ андезитов купола по составу минералов и по составу включений минералообразующих сред аналогична парагенезису вкрапленников $P1+CPx+OPx$ в посткальдерных базальтовых потоках, который образовался при плавлении островодужного субстрата.

Таким образом минералы-вкрапленники андезитов купола вулкана Меньший Брат представляют собой перитектический парагенезис, образованный при дегидратационном плавлении островодужной коры. Для характеристики кислого расплава, образованного в результате плавления, был рассчитан нормативный минеральный состав методом CIW . Состав представлен на диаграмме полевых

шпатов. Характерной чертой является широкий разброс составов расплавов в поля от тоналитов до гранодиоритов на этой диаграмме (Рис. 62).

Вероятно, эти породы образованы при смешении кислой магмы с расплавом более основного состава. Это смешение не повлияло на минеральный состав рассмотренных пород, так как не наблюдается признаков наличия нескольких парагенезисов вкрапленников. Оно могло отразиться в валовом составе пород купола, что повлекло смещение состава пород от дацитов (Ермаков, Штэйнберг, 1999) в область андезитов на TAS-диаграмме.

5.5. Выводы о генезисе синкальдерных вулканитов

1. Исходный расплав, из которого образовались синкальдерные риолитовые пемзы и андезиты вулкана Меньший Брат имел дацит-риолитовый состав с содержанием SiO_2 до 81 мас. %.

2. Риолитовые пемзы содержат 2 парагенезиса вкрапленников. Первый из них – перитектический парагенезис плагиоклаза, энстатита и авгита. Второй – вкрапленники кварца, кристаллизовавшиеся при эволюции риолитового расплава.

3. Содержания воды в дацит-риолитовом расплаве достигали 6,6 мас. %.

4. Вкрапленники пироксенов и плагиоклаза синкальдерных риолитов кристаллизовались в кислом расплаве в интервале температур 800 – 920 °С.

5. Вкрапленники плагиоклаза, энстатита и авгита в риолитовых пемзах и андезитах представляют собой перитектический парагенезис. Он образовался в результате частичного плавления метабазитов островодужной коры, с образованием дацит-риолитового расплава.

6. Андезиты содержат только перитектический парагенезис вкрапленников, представленный авгитом, энстатитом и плагиоклазом, который кристаллизовался в интервале температур 800 – 1090 °С.

Полученные данные о составе синкальдерных пород, а также минералов и расплавных включений в них позволяют сформулировать третье защищаемое положение:

Всё разнообразие пород вулкана Меньший Брат образовано при взаимодействии базитовой магмы, образовавшейся при плавлении мантийного клина, и кислой магмы, образовавшейся при плавлении островодужной коры.

Заключение

6.1. Новейшие данные по составу летучих компонентов в магмах

Исследование газовой фазы флюидных и расплавных включений в магматических минералах методом ГХ-МС позволило получить принципиально новую информацию о летучих компонентах, участвующих в магматических процессах (Табл. 12S (Приложение)). Было установлено, что газовая фаза расплавных и флюидных включений во вкрапленниках базальтов и риолитов вулкана Меньший Брат преимущественно состоит из органических соединений, доля которых составляет 52 – 92 отн. % (Рис. 63). В составах газовой фазы, извлеченной из включений, обнаружено более 300 разнообразных соединений, среди которых присутствуют алифатические, циклические и гетероциклические углеводороды (Рис. 64), а также азот-, серо-, фосфор- и галогенсодержащие органические вещества. Неорганические соединения представлены в подчиненном количестве. Среди них преобладают CO_2 , H_2O , SO_2 и N_2 .

Метод газовой хромато-масс-спектрометрии применяется для изучения включений минералообразующих сред сравнительно недавно (Andrawes et al., 1984). Дополняя друг друга, газовая хроматография (ГХ) и масс-спектрометрия (МС) позволяют обойти главные проблемы каждого из этих методов: низкой чувствительности ГХ и сложного наложения линий сигналов МС (Salvi, William-Jones, 2003). Он применялся для определения составов газовой фазы включений минералообразующих сред в алмазах (Бульбак и др., 2018; Sobolev et al., 2019a; Сокол и др., 2020), минералах мантийных пород (Томиленко и др., 2015; Томиленко и др., 2016; Sobolev et al., 2019b), метаморфических пород (Schreiber et al., 2017; Grozeva et al., 2020) и в гидротермальных минералах рудных месторождений (Рябуха и др., 2015; Бульбак и др., 2020; Shaparenko et al., 2021), минералах осадочных пород, связанных с месторождениями нефти и газа (Karlsen et al., 1993; George et al., 2012).

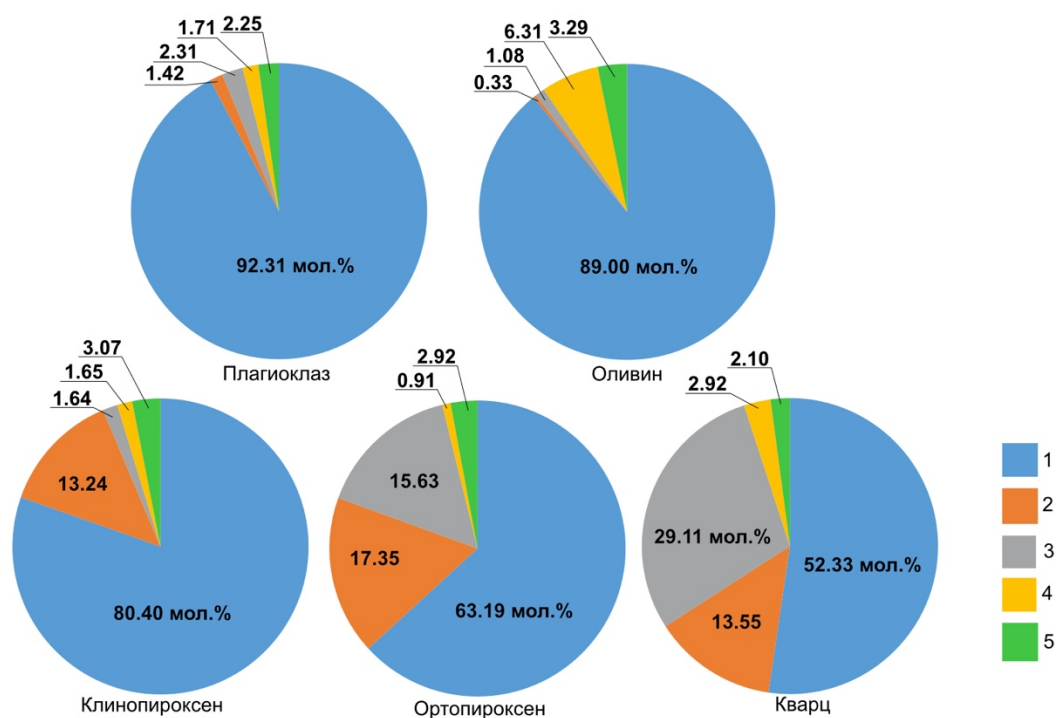


Рис. 63. Содержания (мол. %) летучих компонентов газовой фазы флюидных и расплавных включений во вкрапленниках базальтов и риолитов вулкана Меньший Брат, о. Итуруп: 1 – все органические соединения. 2 – H_2O , 3 – CO_2 , 4 – соединения серы, 5 – остальные газы.

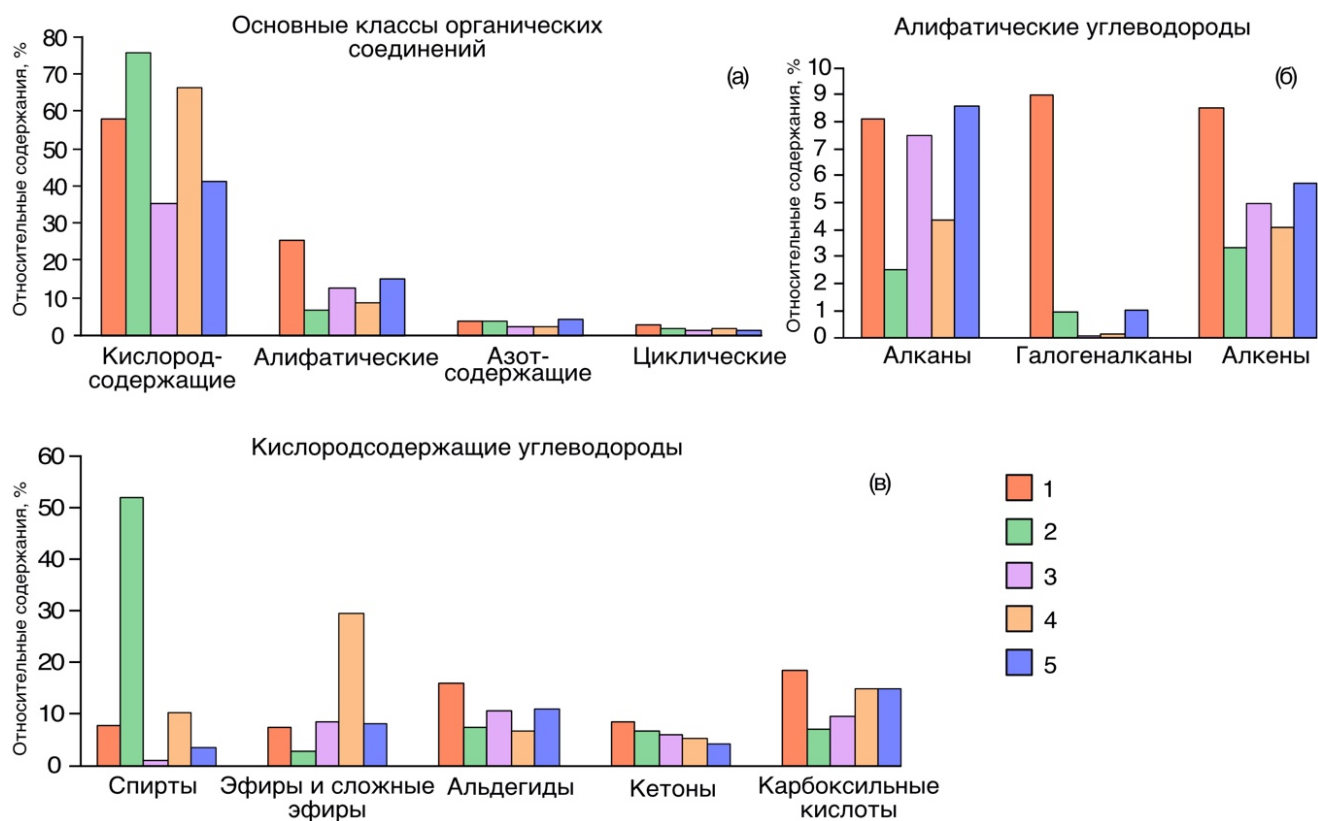


Рис. 64. Относительные содержания углеводов во вкрапленниках плагиоклаза (1) и оливина (2) из базальтов, кварца (3), клинопироксена (4) и ортопироксена (5) из риолитов вулкана Меньший Брат: а – содержания главных органических соединений, б – содержания алифатических соединений, в – содержания кислородсодержащих органических соединений.

Использование ГХ позволило продемонстрировать, что углеводороды могут играть значительную роль в магматическом флюиде на примере включений в минералах щелочных агпайтовых пород (Konnerup-Madsen et al., 1981; Ikorski, 1991; Когарко и др., 1986; Salvi, Williams-Jones, 1997). В работе (Konnerup-Madsen et al., 1981) была применена комплексная методика, где одновременно, но порознь были использованы ГХ и МС. Однако до настоящего времени при валовом анализе изучение состава газовой фазы флюидных и расплавных включений в магматических минералах опирается главным образом на использование метода ГХ, что резко ограничивает возможности идентификации индивидуальных соединений из-за высокого порога чувствительности. Наше исследование является

одним из первых применений метода ГХ-МС для изучения включений в минералах, связанных с процессами современного вулканизма.

В настоящее время изучение состава вулканических эманаций является наиболее распространенным подходом к определению химизма магматогенных флюидов в областях современного вулканизма. С развитием и применением метода ГХ-МС для определения состава вулканических газов появилась возможность определять в них более разнообразные по сравнению с обычной газовой хроматографией (ГХ) органические соединения. Если ранние исследования методом ГХ говорили о присутствии только легких и средних (до C_8) алифатических углеводородов (Taran et al., 1995; Schwandner et al., 2004), то сейчас появляется все больше данных о присутствии в составе вулканических эксгаляций более тяжелых и сложных органических веществ (Tassi et al., 2015), включая кислород-, азот-, серо- и галогенсодержащие соединения. В составе газов из fumarol и термальных источников вулканов Вулькано и Этна (Италия) в работе (Tassi et al., 2015) упоминается о 64 органических соединениях с углеродными номерами, достигающими C_{10} . Пленки нефти обнаружены в термальных источниках некоторых активных вулканических центров, например, в кальдере Узон (Галимов и др., 2015).

Прямое применение знаний о составах газов fumarol и термальных источников в областях современного вулканизма для интерпретации результатов исследований газовой фазы флюидных и расплавных включений встречает ряд трудностей. Во-первых, далеко не всегда состав fumarольных газов, особенно низкотемпературных, отвечает собственно магматическим эманациям. Как уже говорилось выше, на пути к поверхности они взаимодействуют с вмещающими породами, водами геотермальных систем и подземных водоносных горизонтов, что может существенно исказить их состав. Во-вторых, отличаются принципы отбора анализируемого вещества. При отборе газов из fumarol и термальных источников применяются селективные поглотители, емкость которых, по отношению к разным газам, резко различается. При введении таких проб в тракт хроматографа

используется пиролиз, который может способствовать изменению соотношений органических компонентов в анализируемой смеси.

При анализе газов по методике, описанной в работе (Бульбак и др., 2020), в тракт хроматографа направляется все вещество, извлеченное из включений. Это вещество имеет непосредственное отношение к захваченной минералообразующей среде и не претерпело изменений в результате взаимодействия с вмещающими породами, геотермальными и метеорными водами. Эти два фактора определяют резкое отличие составов газовой фазы включений и составов фумарольных газов вулканов, например, расположенного в непосредственной близости от вулкана Меньший Брат вулкана Кудрявый (Рис. 65). Но, с другой стороны, именно эти данные наиболее адекватно отражают состав магматогенной газовой фазы.

Эти результаты показывают, что в составе газовой фазы включений в минералах из вулканических пород присутствуют углеводородные молекулы с углеродными номерами до C₁₇. Состав углеводородов магматогенного флюида гораздо сложнее, чем состав органической составляющей вулканических газов. Результаты проведенных исследований дают основание полагать, что органические газы могут в сумме преобладать над неорганическими. Однако, сопоставление с результатами работ (Tassi et al., 2012; Scwandner et al., 2013) показывает, что соотношения углеводородных соединений в вулканических газах и газовой фазе расплавных и флюидных включений в минералах базальтов и риолитов вулкана Меньший Брат имеют общие черты. Так, например, в фумарольных газах, так же, как и во включениях, среди органических соединений доминируют кислородсодержащие вещества.

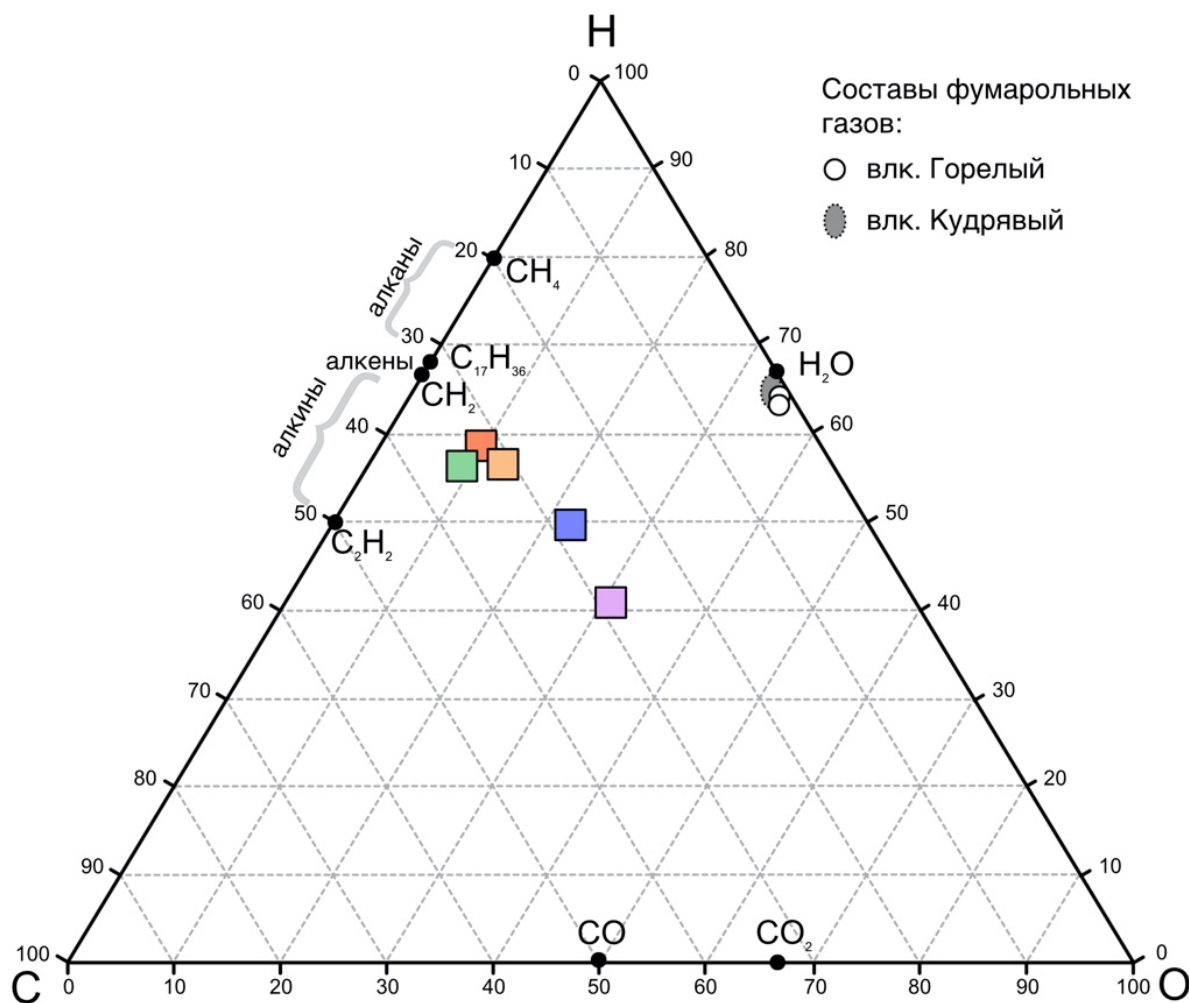


Рис. 65. Соотношения (атомные %) кислорода, углерода и водорода в валовом составе газовой фазы флюидных и расплавных включений во вкрапленниках плагиоклаза (1) и оливина (2) из базальтов, кварца (3), клинопироксена (4) и ортопироксена (5) из риолитов вулкана Меньший Брат на диаграмме С-О-Н в сравнении с составами фумарольных газов активных вулканов Кудрявый (кальдера Медвежья (Taran et al., 1995)) и Горелый (Камчатка (Чапалыгин и др., 2015)). Условные обозначения как на (Рис. 64).

Большое разнообразие и высокие концентрации органических соединений в изученных включениях могут быть обусловлены несколькими причинами. С одной стороны, обнаруженные нами соединения могли исходно содержаться в захваченном флюиде. С другой - они могли возникнуть в результате эволюции содержимого флюидных и расплавных включений после их захвата. Постзахватная эволюция могла привести к образованию углеводородов из неорганических газов или преобразованию их молекулярного состава при снижении температуры магм

от исходных высоких, которые для оливина из базальтов составляют 1100-1170°C, а для кварца – 960-980°C (Толстых и др., 1997; Коваленко и др., 2004; Низаметдинов и др., 2019а), до температуры окружающей среды. Такие реакции действительно протекают при резком снижении температуры в магматогенной газовой фазе и способствуют образованию более сложных и тяжелых углеводородов из более простых молекул (Zolotov, Shock, 2000). Детали возможных реакций мы рассмотрим ниже. Однако, для дальнейших рассуждений составы газовых фаз были пересчитаны на элементы (атомные %) и нанесены на треугольную диаграмму С-О-Н (Рис. 65).

Рассмотрим возможность синтеза углеводородов из неорганических газов в ходе постзахватного изменения вещества включений. Одним из механизмов образования углеводородов из неорганических газов являются реакции Фишера-Тропша, подразумевающие взаимодействие СО или СО₂ с Н₂. В результате образуются алифатические углеводороды, Н₂О и СО₂. Эти реакции проходят только в присутствии катализатора, которыми могут являться переходные металлы или алюмосиликаты и эффективность синтеза снижается с ростом углеродного числа молекул. Кроме этого, процессы типа Фишера-Тропша не позволяют получить кислородсодержащие органические соединения, которые доминируют в составе газовой фазы изученных нами включений.

Данные ГХ-МС для включений расположены левее линий, соединяющих точки составов Н и СО или СО₂ на (Рис. 65), на которых должны находиться молекулы, образованные за счет реакций типа Фишера-Тропша. Таким образом, органические соединения в составе газовой фазы невозможно приписать к реакциям этого типа. Точки составов газовой фазы включений близки к линии, соединяющей составы углеводородов с отношением С/Н 1:2 с точкой СО₂ (Рис. 65). Это позволяет предположить, что газовая фаза включений исходно содержала смесь, описываемую системой: углеводороды, имеющие С/Н ~1:2 (тяжелые алканы и алкены), с СО₂. Таким образом, роль реакций синтеза углеводородов из неорганических соединений во включений можно считать крайне незначительной.

Третьей причиной, объясняющей изобилие углеводов в ГХ-МС анализах, может являться преобразование состава газовой фазы после вскрытия включений и перемещения их в тракт хроматографа. Вскрытие включений производится механически при температурах 130 – 160 °С, что способствует переводу жидких фаз в газообразное состояние. При этом температуры не настолько высоки, чтобы обеспечить пиролиз выделившихся углеводородных соединений (Бульбак и др., 2020). Поток инертного газа-носителя обеспечивает быстрое и эффективное разбавление выделившегося из включений вещества, что резко снижает вероятность реакций между органическими молекулами и превращение одних соединений в другие. Таким образом, способ извлечения газовой фазы из включений и ее ввода в тракт хроматографа и масс-спектрометра исключает преобразование органического вещества включений, маскирующее их изначальный состав.

Приведенные рассуждения демонстрируют, что полученные в результате ГХ-МС анализа данные о составе газов из минералов продуктов извержений вулкана Меньший Брат отражают состав газовой фазы расплавных включений. Эта информация позволяет утверждать, что углеводородные соединения, в том числе и те, которые идентифицируются в составе вулканических газов, могут иметь глубинное происхождение и транспортироваться в составе магм.

Полученные данные ГХ-МС показали, что углеводородные компоненты газовой фазы включений могут содержать Cl, S, N и P, что существенно расширяет представления о возможных формах транспорта этих элементов в магматических расплавах и флюидах. Насколько значимы углеводородные формы транспорта этих элементов можно судить, сопоставив их содержания в органической и неорганической газовых составляющих. Соотношения $S_{орг}/S_{неорг}$ (0,02-0,10) и $N_{орг}/N_{неорг}$ (0,10-0,25) в измеренных составах газов свидетельствует о доминирующей роли неорганических соединений серы и азота в магматогенных флюидах Меньшего Брата. В отличие от серы и азота, в газовой фазе отсутствуют галогенводородные соединения, обычные в фумарольных газах, но присутствует

небольшое количество галогенсодержащих углеводородов. Это говорит о том, что галогены могут присутствовать в магматогенных флюидах в виде углеводородных соединений хлора, фтора и брома. То же самое можно предположить и для фосфора.

6.1.1. Применение данных ГХ-МС для реконструкции состава и свойств флюидов в магмах кальдеры Медвежья

Изучение газовой фазы флюидных и расплавных включений в минералах вкрапленников синкальдерных пемз и посткальдерных базальтов и андезибазальтов, позволяет сопоставить составы магматогенных флюидов кальдерного и посткальдерного этапов развития кальдеры Медвежья.

Базальтовые магмы, формировавшие шлаковые конусы и потоки основных лав наиболее поздних извержений МБ, характеризовались более высоким содержанием углеводородов, чем предшествовавшие им риолитовые магмы кальдерного этапа. Следует заметить, что газы включений в клинопироксене риолитов имеют составы, близкие к газам включений в оливине и плагиоклазе базальтов. Это может иметь различные объяснения. Один из вариантов предусматривает, что состав летучих в очаге риолитовой магмы эволюционировал от более ранних вкрапленников темноцветов, кристаллизовавшихся в более восстановительных условиях, к более поздним вкрапленникам кварца, кристаллизовавшихся в более окислительных условиях. Второй вариант предусматривает, что вкрапленники клинопироксена представляют собой ксенокристы, образовавшиеся в ходе эволюции более основной магмы, родственной по составу магнезиальным базальтам МБ. Однако, состав стекол расплавных включений в клинопироксене, соответствующий риолиту, а также характер распределения примесных элементов в составе фенокристов позволяют отнести клинопироксен к продуктам кристаллизации именно синкальдерных риолитов.

Тем не менее, в любом из обозначенных случаев при кристаллизации кварца состав летучих компонентов становится несколько более окисленным, что

проявляется в доминировании карбоновых кислот и кетонов среди кислородсодержащих углеводородов и рост концентраций воды и углекислоты. Как показано в предыдущих главах, плагиоклаз базальтов Меньшего Брата кристаллизуется из расплава значительно более кислого состава чем оливин. Эти расплавы имели более высокий окислительный потенциал, который соответствует кислородному буферу $\text{NNO}+3$ ($\pm 0,5$, 2σ), оцененный по составу Fe-Ti оксидов по (Anderson, Lindsley, 1985), в сравнении с расплавом, из которого кристаллизовался оливин (на уровне буфера $\text{NNO}+0,3$ (± 0.2 , 2σ)). Поэтому, вероятно, составы летучих в плагиоклазе ближе к включениям в ортопироксене и кварце риолитов. В них среди кислородсодержащих углеводородов преобладают альдегиды, что подтверждает более окисленный характер летучих компонентов.

Наибольшие концентрации углеводородов характерны для основных магм вулкана Меньший Брат, имеющих мантийное происхождение. Это предполагает, что углеводороды либо транспортируются мантийными расплавами, либо могут возникнуть в ходе эволюции флюидных фаз, генетически связанных с мантийными магмами. Возникновение и эволюция риолитовых магм происходит в верхних горизонтах островодужной коры, где существенное влияние имеют метеорные и морские воды. Последние участвуют в процессах гидротермального преобразования пород, вмещающих вулканические очаги. Частичное плавление таких пород или контаминация ими более основных магм могли бы привести к образованию риолитовых расплавов, участвовавших в образовании кальдеры Медвежья и слагающих пемзовую толщу у основания вулкана Меньший Брат. Верхнекоровые процессы генерации кислых магм с вовлечением гидротермально-измененных пород характеризуются более высокими величинами $f\text{O}_2$, чем эволюция мантийных расплавов. Этим можно объяснить и некоторое увеличение окисленности летучих компонентов, извлеченных из включений в ортопироксене и кварце риолитовых пемз.

Данные, полученные ГХ-МС, убедительно демонстрируют, что глубинные и коровые магмы могут быть транспортерами углеводородного вещества. Газы,

извлеченные из расплавных и флюидных включений, обладают гораздо более сложными составами, чем предполагалось ранее. Наиболее распространенные модели флюидно-магматических и рудных процессов предполагают доминирование H_2O и CO_2 в магматогенных флюидах, опираясь на результаты изучения вулканических эманаций и фрагментарные определения составов флюидных фаз индивидуальных расплавных включений методом спектроскопии комбинационного рассеяния. По-видимому, эту точку зрения следует пересмотреть с учетом того, что наиболее ранние порции магматогенных флюидов могут преимущественно состоять из компонентов, способствующих образованию органических соединений.

6.2. Петрогенетическая модель посткальдерного вулканизма

Все наблюдаемое разнообразие вулканических горных пород вулкана Меньший Брат от кальдерных риолитов до посткальдерных базальтов обусловлено взаимодействием двух крайних компонентов. Первый из них – это исходный базальтовый расплав, а второй – магма, содержащая кислый расплав и перитектический парагенезис авгита, энстатита и плагиоклаза. Ведущая роль в этом взаимодействии отводится базальтовому расплаву, влияние которого проявляется как на кальдерном, так и на посткальдерном этапе вулканической активности в кальдере Медвежья (Рис. 66).

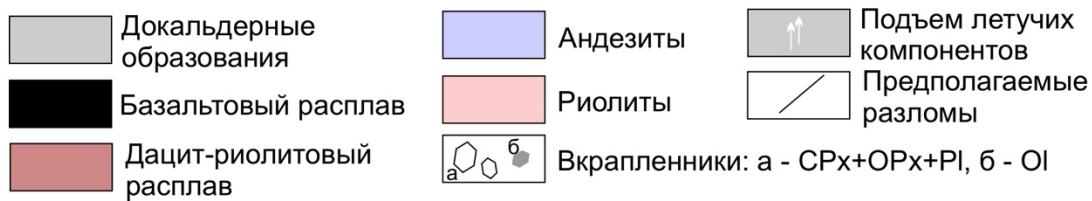
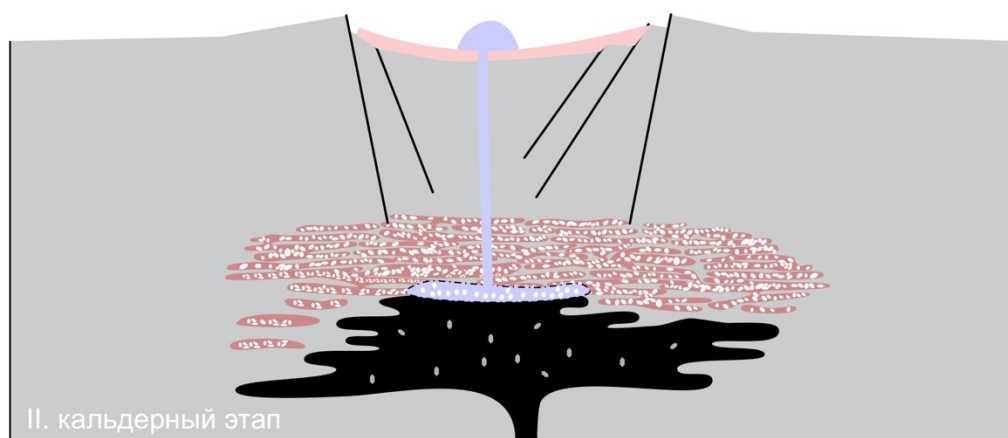
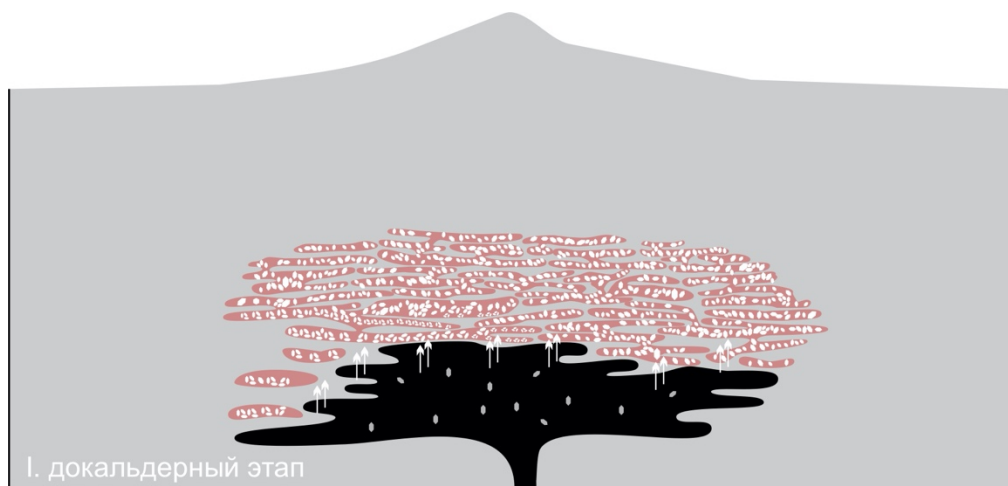


Рис. 66. Петрогенетическая модель посткальдерного вулканизма вулкана Меньший Брат.

Полученные данные о составе и температурах расплавов, участвовавших в образовании вулкана Меньший Брат хорошо согласуются с современными представлениями об образовании крупных очагов кислых магм при плавлении коровых пород под действием тепла относительно более горячих базальтовых расплавов (Hildreth, 1981; Smith, Leeman, 1987; Atherton, Petford, 1993; Rapp, Watson, 1995; Dungan, Davidson, 2004).

1. На докальдерном этапе происходило внедрение высокомагнезиальных пикробазальтовых расплавов в верхний горизонт островодужной коры с образованием крупного магматического очага. Эти расплавы имели температуру 1090-1220 °С и, вероятно, являлись источником тепла для образования крупного очага кислых магм.

Эти пикробазальтовые расплавы были образованы при плавлении мантийного клина на глубинах порядка 45 км при температуре 1200-1250 °С. Источником расплава могли являться перидотиты мантийного клина и пироксениты основания островодужной коры в соотношении 80:20 соответственно. Они имели исходно 5 мас. % воды, содержания которой падали при подъеме этих расплавов к очагу. Дегазация расплава могла начаться на глубинах, соответствующих давлениям ~6 кбар (Рис. 67). Массовая дегазация расплава могла обеспечивать насыщение очага кислой магмы летучими компонентами, особенно водой.

Образование крупного очага кислой магмы над очагом базитовых магм (Рис. 62 I) происходило при плавлении metabазитов островодужной коры в интервале температур 900-1190 °С. Этим протолитом могли являться докальдерные вулканиты миоценового возраста. Кислые магмы, образованные при плавлении, содержали кислый дацит-риолитовый расплав и перитектический парагенезис авгита, энстатита и плагиоклаза.

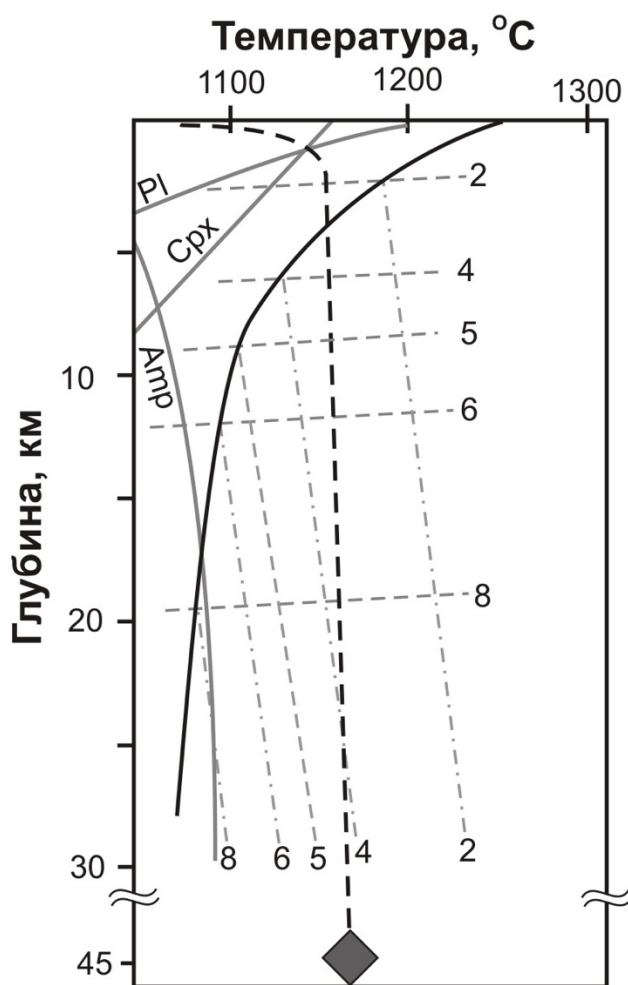


Рис. 67. Предположительная адиабата эволюции водосодержания пикробазальтового первичного расплава, из которого образовались магнезиальные базальты вулкана Меньший Брат (диаграмма из (Plank et al., 2013) с дополнениями автора).

2. На кальдерообразующем этапе происходит серия извержений кислого магматического очага с образованием крупной кальдерной депрессии и толщи игнимбритов и риолитовых пемзовых туфов, которая на сегодняшний день выходит на поверхность в южной части кальдеры Медвежья.

Завершающая стадия кальдерообразования характеризуется извержением вулканитов андезит-дацитового состава (Рис. 66 II). Они слагают синкальдерные купола вулканов Медвежий, Средний, Кудрявый, Меньший Брат, а также купол Силеневый и более мелкие экструзивные тела.

Магмы, из которых образованы внутрикальдерные экструзивные купола образованы при смешении двух контрастных по составу компонентов. Первый из них это кислые магмы, образованные при плавлении metabазитов, а второй – базитовый мантийный расплав.

3. Посткальдерная стадия характеризуется извержениями базальтов, андезит-базальтов и андезитов с образованием лавовых потоков и покровов вулканов Меньший Брат, Медвежий, Средний, Кудрявый.

Лавовые потоки вулкана Меньший Брат образованы при смешении двух контрастных по составу магм. Одна из них содержала исходно мантийный базальтовый расплав и вкрапленники оливина, а вторая – кислый расплав и вкрапленники авгита, энстатита и плагиоклаза. Смешение магм обуславливает наблюдаемые структурно-текстурные особенности рассматриваемых горных пород. В структуре пород смешение выражается в большом количестве гломеропорфировых вкрапленников, образованных сростками плагиоклаза, энстатита и авгита. Оливин же не образует сростков с этими минералами. Помимо этого, не обнаружено минеральных включений оливина и хромистой шпинели в остальных вкрапленниках.

Непосредственно перед смешением, кислая магма содержала доминирующее количество вкрапленников и подчиненное количество кислого расплава. Смешение сильно повлияло на минеральный состав посткальдерных базальтов, но относительно слабо повлияло на содержания петрогенных компонентов в них, так как количество кислого расплава не превышало 17 отн. % в составе базальтов.

Список литературы

Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волынец О.Н. и др., Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. - М.: Наука, 1992. 528 с.

Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. - 2006. - Т. 14. - № 3. - С. 249 – 267.

Альмухамедов А. И., Медведев А. Я. Экспериментальное исследование кристаллизации толеитового базальта при высоких pO_2 : модель формирования кислых остаточных расплавов в процессах эволюции основных магм // Геология и геофизика. – 1995. - Т. 36. - № 5. - С. 55-63.

Ананьев В.В., Селянгин О.Б. Ренит в расплавных включениях из оливина алливалитовых нодулей вулкана Малый Семячик и базальтов вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и Сейсмология. – 2011. – Т. 5, - С. 1–7.

Андреева Е.Д., Баскина В.А., Богатилов О.А., Бородаевская В.И. и др. Магматические горные породы-Т. 1.. - М.: Наука, 1983. – 368 с.

Бакуменко И.Т., Томиленко А.А., Базарова Т.Ю., Ярмолюк В.В. Об условиях формирования вулканитов Западно-Забайкальской позднемезозойской-кайнозойской вулканической области (по данным изучения расплавных и флюидных включений в минералах) // Геохимия. – 1999. - Т. 12. - С. 1352—1356.

Бульбак Т.А., Логвинова А.М., Сонин В.М., Соболев Н.В., Томиленко А.А. Особенности состава летучих компонентов в алмазах из россыпей северо-востока Сибирской платформы (по данным газовой хромато–масс–спектрометрии) // Доклады академии наук. – 2018. - Т. 481. - № 3. - С. 310-314.

Бульбак Т.А., Томиленко А.А., Гибшер Н.А., Сазонов А.М., Шапаренко Е.О., Рябуха М.А., Хоменко О.М., Сильянов С.А., Некрасова Н.А. Углеводороды во

флюидных включениях из самородного золота, пирита и кварца месторождения Советское (Енисейский Кряж, Россия) по данным беспирилизной газовой Хромато-масс-спектрометрии // Геология и Геофизика. – 2020. - Т. 61. - № 11. - С. 1535-1560.

Галимов Э.М., Севастьянов В.С., Карпов Г.А., Камалеева А.И., Кузнецова О.В., Коноплева И.В., Власова Л.Н. Углеводороды из вулканического района. Нефтепроявления в кальдере вулкана Узон на Камчатке // Геохимия. – 2015. - 12. - С. 1059-1068.

Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. - М.: Наука, 1967. - 288 с.

Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Различные пути эволюции верхнекоровых магматических очагов кальдерных комплексов Восточной Камчатки. Часть I. Строение пирокластических потоков, сравнительная минералогия // Вулканология и сейсмология. - 2001. - №4. - С. 3-17.

Дистлер В.В., Юдовская М.А., Знаменский В.С., Чаплыгин И.В. Элементы группы платины в современных фумаролах вулкана Кудрявый (остров Итуруп, Курильская островная гряда) // Доклады Академии наук. - 2002. - Т. 387. - № 2. - С. 237-241.

Ерёмина Т.С., Хубуная С.А., Колосков А.В., Москалёва С.В. Известково-щелочные и субщелочные базальты и андезибазальты вулканов Ключевской, Харчинский и Плоский Толбачик (ТТИ-50) — вулканические продукты разноглубинной мантии // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». - 2014. - С. 69-82.

Ермаков В.А., Семакин В.П. Геология кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) // Доклады Академии наук. - 1996. - Т. 351. - № 3. - С. 361-365.

Ермаков В.А., Штейнберг Г.С. Вулкан Кудрявый и эволюция кальдеры медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. - 1999. - № 3. - С. 19- 40.

Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. - М., Недра, 1979. - 272 с.

Карманова Н.Г., Карманов Н.С. Универсальная методика рентгенофлуоресцентного силикатного анализа горных пород на спектрометре FRL-9900XP // VII всероссийская конференция по рентгеноспектральному анализу. - 2011. - С. 126

Коваленко В.И., Наумов В.Б., Толстых М.Л., Царева Г.М., Кононкова Н.Н. Состав и источники магм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) по данным изучения расплавных включений // Геохимия. – 2004. – Т. 5. - С. 467-487.

Когарко Л.Н., Костольяни Ч., Рябчиков И.Д. Геохимия восстановленного флюида щелочных магм // Геохимия. – 1986. – Т. 12. - С. 1688-1695.

Котов А.А., Смирнов С.З., Плечов П.Ю., Персиков Э.С., Черткова Н.В., Максимович И.А., Карманов Н.С., Бухтияров П.Г. Методика определения содержания воды в природных расплавах риолитового состава методами спектроскопии комбинационного рассеяния и электронно-зондового микроанализа // Петрология. – 2021. - Т. 29. - № 4. - С. 429-448.

Крашенинников С.П., Соболев А.В., Асафов Е.В., Каргальцев А.А., Борисов А.А. Рутинная методика гомогенизации расплавных включений в минералах в высокотемпературной турбчатой печи при атмосферном давлении // Всероссийский ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВСЭМПГ-2018). - 2018. - С. 82.

Крашенинников С.П., Соболев А.В., Батанова В.Г., Каргальцев А.А., Борисов А.А. Экспериментальная проверка моделей равновесия оливин-расплав в области высоких температур // Доклады Академии наук. – 2017. - Т. 475. - № 5. - С. 559-563.

Кременецкий А.А., Чаплыгин И.В. Содержание рения и других редких металлов в газах вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // Доклады Академии наук. - 2010. – Т. 430. - № 3. - С. 365-370.

Лаврентьев Ю.Г., Королук В.Н., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н. Рентгеноспектральный микроанализ породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100 // Геология и геофизика. - 2015. - Т. 56. - № 10. - С. 1813-1824.

Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Сумма концентраций компонентов как показатель качества рентгеноспектрального микроанализа минералов // Геология и Геофизика. – 2018. - Т. 59. - № 11. - С. 1827-1835.

Леонов В.Л. Четвертичные кальдеры Камчатки: обзор, классификация, структурная позиция // Вулканология и сейсмология. - 2003. - № 2. - С. 13-26.

Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. - 189 с.

Мартынов А.Ю., Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Кимура Дж.-И. Роль задуговых процессов в происхождении субдукционных магм: новые данные по изотопии Sr, Nd и Pb в вулканитах ранних этапов формирования о. Кунашир (Курильская островная дуга) // Геология и геофизика. - 2015. – Т. 56. - №3. - С. 469 – 487.

Мелекесцев И.В. Эксплозивное кальдерообразующее суперизвержение Опала IV - крупнейшее на Камчатке за последние 50 тыс. лет // Вулканология и сейсмология. – 2016. - № 1. - С. 21-36.

Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Эрлих Э.Н., Шанцер А.Е., Челебаева А.И., Лупикина Е.Г., Егорова И.А., Кожемяка Н.Н. (1974) Камчатка. Курильские и Командорские острова // История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. / Отв. ред. Лучицкий И.В. М.: Наука. - 437 с.

Мелекесцев И.В., Волынец О.Н., Антонов А.Ю. Кальдера Немо-III (о-в Онекотан, Северные Курилы): строение, ^{14}C -возраст, динамика кальдерообразующего извержения, эволюция ювенильных продуктов // Вулканология и сейсмология. - 1997. - № 1. - С. 32-51.

Миронов Н.Л., Тобелко Д.П., Смирнов С.З., Портнягин М.В., Крашенинников С.П. Оценка содержания CO_2 в газовой фазе расплавных включений с использованием рамановской спектроскопии (на примере включений в оливине Карымского вулкана, Камчатка) // Геология и Геофизика. – 2020. - Т. 61. - № 5-6. - С. 734-747.

Назарова Д.П., Портнягин М.В., Крашенинников С.П., Миронов Н.Л., Соболев А.В. Исходное содержание H_2O и условия образования родоначальных магм вулкана Горелый (Южная Камчатка) по данным микро элементной термобарометрии // Доклады академии наук. - 2017. - Т. 472. - № 3. - С. 311–314.

Наумов В.Б., Толстых М.Л., Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Кононкова Н.Н. Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов Карымского вулканического центра (Камчатка) и вулкана Головнина (о. Кунашир) по данным изучения включений в минералах // Петрология. – 2008. - Т. 16. - № 1. - С. 3-20.

Некрылов Н.А., Попов Д.В., Плечов П.Ю., Щербаков В.Д., Данюшевский Л.В., Дирксен О.В. Гранат-пироксенитовый источник расплавов на Камчатке: состав расплавных включений и оливина голоценовых пород Кекукнайского вулкана// Петрология. - 2018. - Т. 26. - № 4. – С. 335–357.

Николаева И.В., Палесский С.В., Козьменко О.А., Аношин Г.Н., Определение редкоземельных и высокозарядных элементов в стандартных геологических образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП МС) // Геохимия. - 2008. - № 10. - С. 1085-1091.

Осоргин Н. Ю., Томиленко А. А. Микротермокамера // Авт. Свидетельство № 1562816СССР от 07.05.1990.

Остапенко В.Ф. Геологическое строение кальдер Медвежья и Заварицкого и связь с ними полезных ископаемых / Автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук, Москва. - 1969. – 19 с.

Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Под ред. Богатикова О.А. и др. С.-П.: ВСЕГЕИ, 2009. - 100 с.

Пискунов Б.Н., Рыбин А.В., Сергеев К.Ф. Петро-геохимическая характеристика кальдеры Медвежьей (о. Итуруп, Курильские острова) // Доклады Академии наук. - 1999. - Т. 368. - № 3. - С. 380-384.

Плечов П. Ю. Методы изучения флюидных и расплавных включений. М.: КДУ, 2014. - 268 с.

Плечов П.Ю., Балашова А.Л., Дирксен О.В. Дегазация магмы кальдерообразующего извержения Курильского озера 7600 лет назад и ее влияние на климат // Доклады Академии наук. - 2010. - Т. 433. - № 3. - С. 386-389.

Плечов П.Ю., Щербаков В.Д., Некрылов Н.А. Экстремально магнезиальный оливин в магматических породах // Геология и Геофизика. – 2018. - Т. 59. - № 12. - С. 2129-2147.

Плечова А.А., Портнягин М.В. Базанова Л.И. Происхождение и эволюция исходных магм фронтальных вулканов Камчатки по данным изучения магматических включений в оливине вулкана Жупановский // Геохимия. - 2011. – Т. 8. - С. 787–812.

Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Том 1. Природа включений и методы их исследования. М.: Мир, 1987. - 557 с.

Рейф Ф.Г. Рудообразующий потенциал гранитов и условия его реализации. М.: Наука, 1990. – 180 с.

Рыбин А.В., Данченко В.Я., Чибисова М.В., Гурьянов В.Б. Магматические комплексы и редкометальное оруденение вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // Вестник Сахалинского областного краеведческого музея. Южно-Сахалинск. - 2000. - № 7. - С. 234-259.

Рыбин А.В., Данченко В.Я., Чибисова М.В., Гурьянов В.Б. Магматические комплексы и редкометальное оруденение вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // Вестник Сахалинского областного краеведческого музея. Южно-Сахалинск. - 2000. - № 7. - С. 234-259.

Рыбин А.В., Чибисова М.В., С.З. Смирнов, Мартынов Ю.А., Дегтерев А.В. Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) // Геосистемы переходных зон. – 2018. – Т. 2. - № 4. – С. 377-385.

Секисова В.С, Смирнов С.З., Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Корово-мантейные ксенолиты: минералогия и петрогенезис // Геология и геофизика. 2021. - Т. 62. - № 3. - С. 422-442.

Смирнов С.З., Рыбин А.В., Соколова Е.Н., Кузьмин Д.В., Дегтерев А.В., Тимина Т.Ю. Кислые магмы кальдерных извержений острова Итуруп: первые результаты исследования расплавных включений во вкрапленниках пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветровой // Тихоокеанская геология. - 2017. - Т. 36. - №1. - С. 50-68.

Соболев А.В. Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология. – 1996. – Т. 4. – № 3. - С. 228 - 239.

Соболев А.В., Батанова В.Г. Мантийные лерцолиты офиолитового комплекса Троодос, о-в Кипр: геохимия клинопироксена // Петрология. – 1995. – Т. 3. - № 5. – С. 487-495.

Сокол А.В., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Сокол И.А., Заикин П.А., Соболев Н.В. Состав флюида восстановленной мантии по экспериментальным данным и результатам изучения флюидных включений в алмазах // Геология и Геофизика. – 2020. - Т. 61. - № 5-6. - С. 810-825.

Тобелко Д.П., Портнягин М.В., Крашенинников С.П., Гриб Е.Н., Плечов П.Ю. Состав и условия образования примитивных магм Карымского вулканического центра (Камчатка) по данным изучения расплавных включений и микроэлементной термобарометрии // Петрология. - 2019. - Т. 27. - № 3. - С. 258-282.

Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н. Три типа расплавов, участвовавших в формировании андезитобазальтов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) // Геохимия. - 1997. – Т. 4. - С. 391-397.

Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Хоменко М.О., Кузьмин Д.В., Соболев Н.В. Состав летучих компонентов в оливинах из разновозрастных кимберлитов Якутии (по данным газовой хромато-масс-спектрометрии) // Доклады Академии наук. – 2016. - Т. 468. - № 6. - С. 684-689.

Томиленко А.А., Кузьмин Д.В., Бульбак Т.А., Тимина Т.Ю., Соболев Н.В. Состав первичных флюидных и расплавных включений в регенерированных оливинах из гипабиссальных кимберлитов трубки Малокуонапская, Якутия // Доклады Академии наук. – 2015. - Т.465. - №2. - С. 213-217.

Трегер В.Е. Оптическое определение породообразующих минералов. М.: Недра, 1968. - 208 с.

Туркина О.М. Модельные геохимические типы тоналит-трондьемитовых расплавов и их природные эквиваленты // Геохимия. - 2000. - № 7. - С. 704-717.

Федоров П.И., Цукалов Н.В., Гептнер А.Р., Петрова В.В. Вулканизм ранней стадии формирования острова Итуруп (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2021. – Т. 49. - № 1. – С. 87-98.

Чаплыгин И.В., Таран Ю.А., Дубинина Е.О., Шапарь В.Н., Тимофеева И.Ф. Химический состав и металлоносность магматических газов вулкана Горелый (Камчатка) // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 463. - №1. - С. 85-89.

Чибисова М.В., Рыбин А.В., Мартынов Ю.А., Округин В.М. Химический состав и минералогия базальтов вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Курильские острова) // Вестник Краунц. Науки о Земле. - 2009. - Т. 13. - № 1. - С.179-186.

Чугаев А.В., Юдовская М.А., Дистлер В.В., Чаплыгин И.В., Еремина А.В. Источники рудообразующего флюида фумарол вулкана Кудрявый (Курильские острова): изотопный состав свинца в газовых конденсатах и минералах сублиматов // Доклады Академии наук. - 2007. - Т. 412. - № 5. - С. 685–688.

Чупин В.П., Косухин О.Н. Диагностика и методика изучения расплавных включений в минералах гранитоидов и пегматитов // Геология и геофизика. – 1982. – №. 10. - С. 66-73.

Шарыгин В.В., Котай К., Сабо Ч., Тимина Т.Ю., Тёрёк К., Вапник Е., Кузьмин Д.В. Рёнит в щелочных базальтах: включения расплава в фенокристах оливина // Геология и геофизика. - 2011. – Т. 52. - № 11. С. 1695–1717.

Шевко А.Я., Смирнов С.З., Гора М.П., Кузьмин Д.В., Тимина Т.Ю. Низкотитанистый аналог рёнита в расплавных включениях из оливин-анортитовых сферолитов вулкана Кудрявый (о. Итуруп) // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии, посвященной 80-летию со дня рождения д-ра

геол.-минерал. Наук Феликса Григорьевича Рейфа (1936–2008). Улан-Удэ, ГИН СО РАН, 12 – 17 сентября 2016, с. 186-188.

Acocella V. Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas // *Earth-Science Review*. – 2007. – V. 85. – P. 125-160.

Almeev R.R., Holtz F., Koeperke J., Fleurice P., Botcharnikov R.E. The effect of H₂O on olivine crystallization in MORB: Experimental calibration at 200 MPa // *American Mineralogist*. - 2007. - V. 92. - P. 670–674.

Andersen D.J., Lindsley D.H. New (and final!) models for the Ti-magnetite/ilmenite geothermometer and oxygen barometer // Abstract AGU 1985 Spring Meeting Eos Transactions. American Geophysical Union. – 1985. – V. 66. - № 18. - P. 416.

Andrawes F., Holzer G., Roedder E., Gibson E.K., Oro J. Gas chromatographic analysis of volatiles in fluid and gas inclusions // *Journal of Chromatography*. - 1984. – V. 302. - P. 181-193.

Aster E.M., Wallace P.J., Moore L.R., Watkins J., Gazel E., Bodnar R.J. Reconstructing CO₂ concentrations in basaltic melt inclusions using Raman analysis of vapor bubbles // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2016. - V. 323. - P. 148-162.

Atherton M. P., Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust // *Nature*. – 1993. - V. 362. - P. 144-146.

Bachmann O., Bergantz G.W. Gas percolation in upper-crustal silicic crystal mushes as a mechanism for upward heat advection and rejuvenation of near-solidus magma bodies // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2006. – V. 149. - № 1-2. – P. 85-102.

Bachmann O., Bergantz G.W. Rejuvenation of the Fish Canyon magma body: A window into the evolution of large-volume silicic magma systems // *Geology*. – 2003. V. – 31. - № 9. – P. 789-792.

Bachmann O., Bergantz G.W. Rhyolites and their source mushes across tectonic settings // *Journal of Petrology*. – 2008. - V. 49. - № 12. – P. 2277-2285.

Bachmann O., Bergantz G.W. The magma reservoirs that feed super eruptions // *Elements*. – 2008. – v. 4. – P. 17-21.

Bachmann O., Miller C.F., de Silva S.L. The volcanic-plutonic connection as a stage for understanding crustal magmatism // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2007. – V. 167. № - 1-4. P. 1-23.

Ballhaus C., Berry R.F., Green D.H., High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen Geobarometer: Implications for the oxidation state of the upper mantle // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. - 1991. - V. 107. - P. 27–40.

Batanova V.G., Sobolev A.V., Kuzmin D.V. Trace element analysis of olivine: High precision analytical method for JEOLJXA-8230 electron probe microanalyser // *Chemical geology*. - 2015. – V. 419. - P. 149-157.

Baziotis I., Economou-Eliopoulos M., Asimow P.D. Ultramafic lavas and high-Mg basaltic dykes from the Othris ophiolite complex, Greece // *Lithos*. – 2017. – V. 288–289. – P. 231–247.

Beard J.S., Lofgren G.E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites // *Journal of Petrology*. - 1991. - V. 32. - № 2. - P. 365-401.

Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K., Portnyagin

M.V., Chen C.H. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar–Ar and U–Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. - 2010. - V. 189. - P. 57–80.

Blondes M.S., Brandon M.T., Reiners P.W., Page F.Z., Generation of forsteritic olivine (Fo_{99,8}) by subsolidus oxidation in basaltic flows // *Journal of petrology*. - 2012. - V. 53. - № 5. - P. 971-984.

Bonaccorsi E., Merlino S., Pasero M. Rhönite: structural and microstructural features, crystal chemistry and polysomatic relationships // *European Journal of Mineralogy*. - 1990. - V. 2. - № 2. - P. 203–218.

Borisov A.A., Shapkin A.I. A new empirical equation rating Fe³⁺/Fe²⁺ in magmas to their composition, oxygen fugacity, and temperature // *Geochemistry International*. - 1990. - V. 27. - P. 111–116.

Borisova A.Y., Pichavant M., Beny J.M., Rouer O., Pronost J. Constraints on dacite magma degassing and regime of the June 15, 1991, climactic eruption of Mount Pinatubo (Philippines): New data on melt and crystal inclusions in quartz // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. - 2005. - V. 145. - P. 35–67.

Brophy J.G. A study of rare earth element (REE)-SiO₂ variations in felsic liquids generated by basalt fractionation and amphibolite melting: a potential test for discriminating between the two different processes // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2008. – V. 156. - № 3. – P. 337-357.

Bucholz C.E., Gaetani G.A., Behn M.D., Shimizu N. Postentrapment modification of volatiles and oxygen fugacity in olivine-hosted melt inclusions // *Earth and Planetary Science Letter*. - 2013. - V. 374. - P. 145–155.

Cadoux A., Sciallet B., Druitt T.H., Deloule E. Magma Storage Conditions of Large Plinian Eruptions of Santorini Volcano (Greece) // *Journal of Petrology*. – 2014. – V. 55. - № 6. – P. 1129-1171.

Capaccioni B., Martini M., Mangani F. Light hydrocarbons in hydrothermal and magmatic fumaroles: hint of catalytic and thermal reactions // *Bulletin of Volcanology*. – 1995. – V. 56. - P. 593–600.

Carey S., Morelli D., Sigurdsson H., Bronto S. Tsunami deposits from major explosive eruptions: An example from the 1883 eruption of Krakatau // *Geology*. – 2001. – V. 29. - № 4. – P. 347-350.

Cashman K.V., Giordano G. Calderas and magma reservoirs // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2014. – V. 288. – P. 28-45.

Chen Y., Provost A., Schiano P., Cluzel N. The rate of water loss from olivine-hosted melt inclusions // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. - 2011. - V. 162. - P. 625–636.

Chesner C.A. Petrogenesis of the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia // *Journal of Petrology*. – 1998. – V. 39. - № 3. - P. 397-438.

Chesner C.A., Luhr J.A. A melt inclusion study of the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. - 2010. - V. 197. - P. 259-278.

Cole J.W. Structural control and origin of volcanism in the Taupo volcanic zone, New Zealand // *Bulletin of Volcanology*. – 1990. - V. 52. – P. 445–459.

Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // *Chemical Geology*. - 2014. - V. 368. P. - 1-10.

Cuno H. High-alumina basalt // *Journal of Petrology*. – 1960. – V. 1. - Iss. 2. – P. 121–145.

Danyushevsky L.V. The effect of small amounts of H₂O on crystallization of mid-ocean ridge and backarc basin magmas // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. - 2001. - V. 110. - P. 265–280.

Danyushevsky L.V., Pasqua F.D., Sokolov S. Re-equilibration of melt inclusions trapped by magnesian olivine phenocrysts from subduction-related magmas: petrological implications // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. – 2000. – V. 138. - № 1. – P. 68-83.

Danyushevsky L.V., Plechov P.Y. Petrolog III: integrated software for modeling crystallization processes // *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. - 2011. - V. 12. - № 7. - P. 1525-2027.

Dasgupta R., Hirschman M.M. The deep carbon cycle and melting in Earth's interior // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2010. - V. 298. - № 1-2. - P. 1-13.

De Paolo D.J. Trace-element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization // *Earth and Planetary Science Letters*. - 1981. - V. 53. - № 2. - P. 189-202.

De Silva S.L. 1989. Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes // *Geology*. – 1989. – V. 17. – P. 1102–1106.

Howie R. A., Zussman J., Deer W. An introduction to the rock-forming minerals. – London, UK : Longman, 1992. – P. 696.

Del Moro S., Renzulli A., Landi P., La Felice S., Rosi M. Unusual lapilli tuff ejecta erupted at Stromboli during the 15 March 2007 explosion shed light on the nature and thermal state of rocks forming the crater system of the volcano // *Journal of volcanology and geothermal research*. - 2013. - V. 254. - P. 37-52.

Druitt T.H. New Insights into the Initiation and Venting of the Bronze-Age Eruption of Santorini (Greece), from Component Analysis // *Bulletin of Volcanology*. – 2014. – V. 79. - № 2.

Dufek J., Bergantz G.W. Lower Crustal Magma Genesis and Preservation: a Stochastic Framework for the Evaluation of Basalt–Crust Interaction // *Journal of Petrology*. – 2005. – V. 46. – P. 2167-2195.

Dungan M.A., Davidson J. Partial assimilative recycling of the mafic plutonic roots of arc volcanoes: An example from the Chilean Andes // *Geology*. – 2004. - №. 32. - № 9. – P. 773-776.

Eichelberger J.C., Izbekov P.E. Eruption of andesite triggered by dyke injection: Contrasting cases at Karymsky Volcano, Kamchatka and Mt Katmai, Alaska // *Philosophical Transactions of the Royal Society a mathematical physical and engineering sciences*. – 2000. – V. 358. – P. 1465-1485.

Ford C.E., Russel D.G., Craven J.A., Fisk M.R. Olivine-liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe²⁺, Ca and Mn // *Journal of petrology*. - 1983. - V. 24. - № 3. - P. 256-265.

Gaetani G.A., O’Leary J.A., Shimizu N., Bucholz C.E., Newville M. Rapid reequilibration of H₂O and oxygen fugacity in olivine hosted melt inclusions // *Geology*. - 2012. - V. 40. - P. 915–918.

Gelman S.E., Gutierrez F.J., Bachmann O. On the longevity of large upper crustal silicic magma reservoirs // *Geology*. – 2013. – V. 41. – P. 759–762.

George, S. C., Volk, H., Dutkiewicz, A. Mass Spectrometry Techniques for Analysis of Oil and Gas Trapped in Fluid Inclusions // *Mass Spectrometry Handbook*. – 2012. - P. 645–673.

Gertisser R., Keller J. From basalt to dacite: origin and evolution of the calc-alkaline series of Salina, Aeolian Arc, Italy // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2000. – V. 139. - № 5. – P. 607-626.

Giggenbach W.F., Martini M., Corazza E. The effects of hydrothermal processes on the chemistry of some recent volcanic gas discharges // Per Mineral. – 1986. - № 55. - P. 15-28.

Gill J. B. Orogenic andesites and plate tectonics. – Springer Science & Business Media, 2012. – V. 16.- 390 p.

Grapes R. and Keller J. Fe²⁺-dominant rhonite in undersaturated alkaline basaltic rocks, Kaiserstuhl volcanic complex, Upper Rhine Graben, SW Germany // European Journal of Mineralogy. – 2010. – V. 22. – P. 285–292.

Grove T.L., Elkins-Tanton L.T., Parman S.W., Chatterjee N., Muntener O., Gaetani G.A. Fractional crystallization and mantle-melting controls on calc-alkaline differentiation trends // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2003. - V. 145. - № 5. – P. 515-533.

Grozeva N.G., Klein F., Seewald J.S., Sylva S.P. Chemical and isotopic analyses of hydrocarbon-bearing fluid inclusions in olivine-rich rocks // Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. – 2020. – V. 378. – 20180431.

Haggerty S.E. Oxide mineralogy of the upper mantle. Spinel mineral group. // Oxide minerals: Petrologic and magnetic significance (D.H. Lindsley, editor). Reviews in mineralogy. Mineralogical society of America. – 1991. - V. 25. - P. 355-416.

Hartley M.E., MacLennan J., Edmonds M., Thordarson T. Reconstructing the deep CO₂ degassing behavior of large basaltic fissure eruptions // Earth and Planetary Science Letter. – 2014. - V. 393. - P. 120—131.

Haughton D.R., Roeder P.L., Skinner J.B. Solubility of Sulfur in Mafic Magmas // *Economic Geology*. - 1974. – V. 69. - № 4. - P. 451–467.

Hermann J., Spandler C.J. Sediment Melts at Subar Depths: an Experimental Study. // *Journal of Petrology*. - 2008. - V. 49. - P. 717–740.

Hildreth W, Wilson C.J.N. Compositional zoning of the Bishop Tuff // *Journal of Petrology*. – 2007. – V. 48. – P. 951-999.

Hildreth W. Gradients in silicic magma chambers - implications for lithospheric magmatism // *Journal of Geophysical Research*. – 1981. - V. 86. - № 11. – P. 153-192.

Hildreth W. Volcanological perspectives on Long Valley, Mammoth Mountain, and Mono Craters: several contiguous but discrete systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2004. – V. 136. – P. 169-198.

Hofmann A.W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust // *Earth and Planetary Science Letters*. - 1988. – V. 90. - P. 297–314.

Hwang S.L., Shen P., Chu H.T., Yui T.F., Varela M.E., Iizuka, Y. Kuratite, $\text{Ca}_4(\text{Fe}_{2+10}\text{Ti}_2)\text{O}_4[\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{36}]$, the Fe^{2+} -analogue of rhönite, a new mineral from the D'Orbigny angrite meteorite // *Mineralogical Magazine*. – 2016. – V. 80. – P. 1067-1076.

Jarosewich E. J., Nelen J. A., Norberg J. A. Reference samples for electron microprobe analyses // *Geostandards Newsletter*. - 1980. - № 4. - P. 43-47

Jochum K., Dingwell D., Rocholl A., Stoll B. Hofmann A., Becker S., Besmehn A., Bessette D., Dietze H.-J., Dulski P., Erzinger, J., Hellebrand E., Hoppe P., Horn I., Janssens K., Jenner G., Klein M., McDonough W., Maetz M., Zimmer M. The Preparation and Preliminary Characterisation of Eight Geological MPI-DING Reference Glasses for In-Situ Microanalysis // *Geostandards Newsletter*. – 2000. - V. 24. - № 1. - P. 87 - 133.

Johnston A.D., Stout J.H. Compositional variation of naturally occurring rhoenite // *American Mineralogist*. – 1985. – V. 70. – P. 1211–1216.

Jull M., Kelemen P.B. On the conditions for lower crustal convective instability // *Journal of Geophysics Research*. - 2001. - V. 106. - P. 6423–6446.

Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks // *Journal of petrology*. - 2001. - V. 42. - №4. - P. 655-671.

Karlsen D.A., Nedkvitne T., Larter S.R., Bjørlykke K. Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: Application to elucidation of petroleum reservoir filling history // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. - V. 57. - P. 3641–3659.

Katz R.F., Spiegelman M., Langmuir C.H. A new parameterization of hydrous mantle melting // *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. - 2003. - V. 4. - № 9. - 1073.

Kelley K.A., Plank T., Newman S., Stolper E.M., Grove T.L., Parman S., Hauri E.H. Mantle melting as a function of water content beneath the Mariana Arc // *Journal of Petrology*. - 2010. - V. 51. - P. 1711–1738.

Kimura J.Ic. Modeling chemical geodynamics of subduction zones using the Arc Basalt Simulator version 5 // *Geosphere*. - 2017. - V. 13. - P. 992-1025.

Konnerup-Madsen J., Rose-Hansen J., Larsen, E. Hydrocarbon gases associated with alkaline igneous activity: evidence from compositions of fluid inclusions // *Rapport Grønlands Geologiske Undersøgelse*. – 1981. - V. 103. - P. 99–108.

Koyaguchi T., Ohno M. Reconstruction of eruption column dynamics on the basis of grain size of tephra fall deposits: 2. Application to the Pinatubo 1991 eruption // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2001. – V. 106. - № B4. – P. 6513-6533.

Kunzmann T., Mineralchemie, Paragenese und Stabilität in alkali basaltischen Vulkaniten, Ein Beitrag zur Mineralogenese der Rhönit-Änimagnit-Mischkristallgruppe // Dissertation Universität München. - 1989. - p. 151.

Kyle P., Price R. Occurrences of Rhonite in Alkalic Lavas of the McMurdo Volcanic Group, Antarctica, and Dunedin Volcano' New Zealand // American Mineralogist. – 1975. – V. 60. - P. 722–725.

Lacroix M.A. (1909) Sur la rhö du Puy de Barneire à Saint-Sandoux // Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie. – 1909. – 32. – P. 325–331.

Lane C.S., Chorn B.T., Johnson T. C. Ash from the Toba supereruption in Lake Malawi shows no volcanic winter in East Africa at 75 ka // Proceedings of the National Academy of Sciences. - 2013. – V. 110. -№ 20. - P. 8025-8029.

Lindsley D. H. Pyroxene thermometry // American mineralogist. - 1983. - V. 68. - P. 477-493.

Macdonald R., Hawkesworth C.J., Heath E. The Lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism // Earth-Science Reviews. - 2000. - V. 49. - P. 1–76.

Magonthier M.C., Velde D. (1976) Mineralogy and petrology of some Tertiary leucite-rhönite basanites from central France // Mineralogical Magazine. – 1976. – V. 316. – P. 817–826.

Mango F.D. The origin of light hydrocarbons // Geochimica et Cosmochimica acta. – 2000. – V. 64. - P. 1265-1277.

Martynov Yu.A., Rybin A.V., Chibisova M.V., Ostapenko D.S., Davydova M.Yu Basaltic volcanism of Medvezhia caldera on the Iturup Island of Kurile Isles: impact of regional tectonics on subduction magmatism // International Geology Review. – 2022. <https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2039885>

Martynov A.Y., Kimura J., Martynov Yu.A., Rybin A.V. Geochemistry of late Cenozoic lavas on Kunashir Island, Kurile Arc // *Island Arc*. – 2010. – V. 19. – № 1. – P. 86-104.

Marxer F., Ulmer P., Muntener O. Polybaric fractional crystallisation of arc magmas: an experimental study simulating trans-crustal magmatic systems // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. – 2022. – V. 177. - № 3.

Mathez E.A. Sulfur solubility and magmatic sulfides in submarine basalt glass // *Journal of Geophysical Research*. - 1976. - V. 81. - № 23. – P. 4269-4276.

McDonough W.F., Sun S.S. Composition of the Earth // *Chemical Geology*. - 1995. – V. 120. - P. 223-253.

Millhollen G.L., Eichelberger J.C. Magma contamination within volcanic pile - origin of andesite and dacite - discussion // *Geology*. – 1975. - V. 3. - № 4. - P. 164-168.

Mironov N., Portnyagin M., Botcharnikov R., Gurenko A., Hoernle K., Holtz F. Quantification of the CO₂ budget and H₂O–CO₂ systematics in subduction-zone magmas through the experimental hydration of melt inclusions in olivine at high H₂O pressure // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2015. – V. 425. – P. 1-11.

Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins // *American Journal of Science*. - 1974. - № 274. - P. 321–355.

Miyagi I., Kita N., Morishita Y. The geochemical and petrological characteristics of prenatal caldera volcano: a case of the newly formed small dacitic caldera, Hijiori, Northeast Japan // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2017. – V. 172. – P. 79.

Monkawa A., Mikouchi T., Matsuyama F., Koizumi E., Miyamoto M., Ohsumi K. Multiple micro-area analyses of rhönite at the opacite rims of kaersutites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2003. - V. 67. - № 18. - P. 301–350.

Moore L.R., Bodnar R.J. A pedagogical approach to estimating the CO₂ budget of magmas // *Journal of the Geological Society*. – 2019. - V. 176. - № 2. - P. 398-407.

Moore L.R., Gazel E., Tuohy R., Lloyd A.S., Esposito R., Steele-MacInnis M., Hauri E.H., Wallace P.J., Plank T., Bodnar R.J. Bubbles matter: An assessment of the contribution of vapor bubbles to melt inclusion volatile budgets // *American Mineralogist*. – 2015. - V. 100. - № 4. - P. 806—823.

Morgan G.B., London D. Effect of current density on the electron microprobe analysis of alkali aluminosilicate glasses // *American Mineralogist*. – 2005. - V. 90. - P. 1131-1138.

Morimoto N., Nomenclature of pyroxenes // *Canadian mineralogist*. - 1989. - V. 27. - P. 143-156.

Nekrylov N., Portnyagin M.V., Kamenetsky V.S., Mironov N.L., Churikova T.G., Plechov P.Yu., Abersteiner A., Gorbach N.V., Gordeychik B.N., Krashennnikov S.P., Tobelko D.P., Shur M.Y., Tetroeva S.A., Volynets A.O. Hoernle K., Wörner G. Chromium spinel in Late Quaternary volcanic rocks from Kamchatka: Implications for spatial compositional variability of subarc mantle and its oxidation state // *Lithos*. - 2019. – V. 322. - P. 212-224.

Oppenheimer C. Climatic, Environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815 // *Progress in Physical Geography: Earth and environment*. – 2003. – V. 27. - № 2. – P. 230-259.

Parman S.W., Grove L.T. Harzburgite melting with and without H₂O: Experimental data and predictive modeling // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2004. – V. 109. - № B2. B02201.

Peacock M.A. Classification of igneous rock series // *Journal of Geology*. - 1931. - V. 39. - P. 54-67.

Pearce N.J.G., Perkins W.T., Westgate J.A., Gorton M.P., Jackson S.E., Neal C.R., Chenery S.P. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 610 glass reference materials // *Geostandards Newsletter, the Journal of Geostandards and Geoanalysis*. – 1997. - V. 21. - № 1. - P. 115-144.

Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Minerals of the rhönite-kuratite series in paralavas from a new combustion metamorphic complex in the Choir–Nyalga basin (Central Mongolia): composition, mineral assemblages and formation conditions // *Mineralogical Magazine*. – 2017. – V. 81. - № 4. – P. 949-974.

Plank T., Cooper L., Manning C.E. Emerging geothermometers for estimating slab surface temperatures // *Nature Geoscience*. - 2009. - V. 2. - P. 611–615.

Plank T., Kelley K. A., Zimmer M.M., Hauri E.H., Wallace P.J. Why do mafic arc magmas contain similar to 4 wt.% water on average? // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2013. - V. 364. - P. 168-179.

Plank T., Manning C.E. Subducting carbon // *Nature*. – 2019. - V. 574. - P. 343-352.

Plechov P. Y., Balashova A. L., Dirksen O. V. Magma degassing during 7600 14C Kurile Lake caldera-forming eruption and its climatic impact // *Doklady Earth Sciences*. – 2010. – T. 433. – №. 1. – C. 974-977.

Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V., Kyle P.R., Rinkleff P.G., Rourke R., Sulerzhitsky L.D., Zaretskaia N.E. The 7600 (14C) year BP Kurile lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: Stratigraphy and field relationships // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. - 2004. - V. 136. - P. 199–222.

Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P., Mironov N., Khubunaya S. Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H₂O, S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc // *Earth and Planetary Science Letters*. - 2007. - V. 255. - P. 53–69.

Putirka K.D. Thermometers and Barometers for volcanic systems // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 2008. – V. 69. - № 1. - P. 61–120.

Rapp R.P., Watson E.B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar - implications for continental growth and crust-mantle recycling // *Journal of Petrology*. - 1995. - V. 36. - № 4. - P. 891-931.

Risse A., Trumbull R. B., Kay S. M., Coira B., Romer R. L. Multi-stage evolution of late Neogene mantle-derived magmas from the Central Andes back-arc in the southern Puna Plateau of Argentina // *Journal of Petrology*. - 2013. - V. 54. - № 10. - P. 1963–1995.

Salvi S., Williams-Jones A.E. Bulk analysis of volatiles in fluid inclusions. In: Samson I., Anderson A., Marshall D. (eds) *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*: Mineralogical Association of Canada, Chapter 10. – 2003. - V. 32. - P. 1-30.

Salvi S., Williams-Jones A.E. Fischer-Tropsch synthesis of hydrocarbons during sub-solidus alteration of the Strange Lake peralkaline granite, Quebec/Labrador, Canada // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. - 1997. - V. 61. - P. 83- 99.

Sano Y., Marty B. Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs // *Chemical Geology*. – 1995. - V. 119. - № 1-4. - P. 265-274.

Sato M., Shuto K., Nohara-Imanaka R., Takazawa E., Osanai Y., Nakano N., Repeated magmatism at 34 Ma and 23-20 Ma producing high magnesian adakitic andesites and transitional basalts on southern Okushiri Island, NE Japan arc // *Lithos*. 2014. Vol. 205. P. 60–83.

Schmidt M.W., Poli S. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation // *Earth and Planetary Science Letter*. - 1998. - V. 163. - P. 361- 379.

Schreiber U., Mayer C., Schmitz O.J., Rosendahl P., Bronja A., Greule M., Keppler F., Mulder I., Sattler T., Schöler H.F. Organic compounds in fluid inclusions of Archean quartz—Analogues of prebiotic chemistry on early Earth // *Plos One*. – 2017. - V. 12. - № 6. e0177570, doi:10.1371/journal.pone.0177570

Schwander F.M., Seward T.M., Gize A.P., Hall K., Dietrich V.J. Halocarbons and other trace heteroatomic organic compounds in volcanic gases from Vulcano (Aeolian Islands, Italy) // *Geochimica et Cosmochimica acta*. – 2013. - V 101. - P. 191-221.

Schwandner F.M., Seward T.M., Gize A.P., Hall P.A., Dietrich, V.J. Diffuse emission of organic trace gases from the flank and crater of a quiescent active volcano (Vulcano, Aeolian Islands, Italy) // *Journal of Geophysical Research*. – 2004. – V. 109, D04301, doi:10.1029/2003JD003890.

Sciallet B., Pichavant M. Experimental constrains on volatile abundances in arc magmas and their implications for degassing processes. In: Oppenheimer C., Pyle D.M., Barclay J. (eds). *Volcanic Degassing*. Geological Society, London, Special Publications. – 2003. – V. 213. - P. 81-101.

Self S., Gertisser R., Thoradson T., Rampino M.R., Wolff J.A. Magma volume, volatile emissions, and stratospheric aerosols from the 1815 eruption of Tambora // *Geophysical Research Letters*. – 2004. – V. 31. - № 20. 10.1029/2004GL020925

Self S., Rampino M.R. The 1883 eruption of Krakatau // *Nature*. – 1981. – V. 294. – P. 699-704.

Shaparenko E., Gibsher N., Tomilenko A., Sazonov A., Bul'bak T., Ryabukha M., Khomenko M., Silyanov S., Nekrasova N., Petrova M. Ore-Bearing Fluids of the

Blagodatnoye Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia): Results of Fluid Inclusion and Isotopic Analyses // Minerals. – 2021. - V. 11. - № 10. – P. 1090.

Shaw D.M. Trace element fractionation during anatexis // Geochimica et Cosmochimica Acta. - 1970. – V. 34. - № 2. - P. 237–243.

Shishkina T.A., Botcharnikov R.E., Holtz F., Almeev R.R., Portnyagin M.V. Solubility of H₂O- and CO₂-bearing fluids in tholeiitic basalts at pressures up to 500 MPa // Chemical Geology. - 2010. - V. 277. – № 1-2. - P. 115-125.

Simoneit, B.R.T., Gize A.P. Analytical Techniques for Organic Matter Characterization in Ore Deposits. In: Ore Genesis and Exploration: The Roles of Organic Matter (Eds. Giordano T.H., Kettler R.M., and Wood S.A.) // Reviews in Economic Geology. – 2000. - V. 9. - P. 27–61.

Smith D.R., Leeman W.P. Petrogenesis of Mount St. Helens dacitic magmas // Journal of Geophysical Research. - 1987. – V. 92. - P. 1313-1334.

Sobolev A.V., Asafov E.V., Gurenko A.A., Arndt N.T., Batanova V.G., Portnyagin M.V., Garbe-Schonberg D., Krashennnikov S.P. Komatiites reveal a hydrous Archaean deep-mantle reservoir // Nature. - 2016. – V. 531. - P. 628-32.

Sobolev A.V., Chaussidon M. H₂O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges: Implications for H₂O storage and recycling in the mantle // Earth and Planetary Science Letters. - 1996. – V. 137. – P. 45-55.

Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V., Yaxley G.M., Anderson A.T., Arndt N.T., Chung S-L, Garcia M.O., Gurenko A.A., Danyushevsky L.V., Elliott T., Frey F.A., Kamenetsky V.S., Kerr A.C., Krivolutskaya N.A., Matvienkov V.V., Nikogosian I.K., Rocholl A, Suschevskaya N.M., Teklay M. Estimating the amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // Science. - 2007. - V. 316. – P. 412-417.

Sobolev N.V., Logvinova A.M., Tomilenko A.A., Wirth R., Bul`bak T.A., Luk`yanova L.I., Fedorova E.N., Reutsky V.N., Efimova E.S. Mineral and fluid inclusions in diamonds from the Urals placers, Russia: Evidence for solid molecular N₂ and hydrocarbons in fluid inclusions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. - 2019a. - V. 266. - P. 197-219.

Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Bul`bak T.A., Logvinova A.M. Composition of Hydrocarbons in Diamonds, Garnet, and Olivine from Diamondiferous Peridotites from the Udachnaya Pipe in Yakutia, Russia // *Engineering*. - 2019b. - V. 5. - № 3. - P. 471-478.

Soellner J. Über Rhönite, ein neues aenigmatitähnliches Mineral und über die Verbreitung desselben in basaltischen Gesteinen // *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie Abhandlungen*. – 1907. – V. 24. – P. 475–547.

Sparks S.R.J., Sigurdsson H., Wilson L. Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions // *Nature*. – 1997. – V. 267. – P. 315-318.

Stolper E., Newman S. The role of water in the petrogenesis of Mariana trough magmas // *Earth and Planetary Science Letter*. - 1994. - V. 121. - P. 293–325.

Sun W., McDonogh W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes // *Geological Society London Special Publications*. – 1989. – V. 42. – P. 313-345.

Syracuse E.M., Van Keken P.E., Abers G.E. The global range of subduction zone thermal models // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. - 2010. - V. 183. – P. 73–90.

Tamura Y., Tatsumi Y. Remelting of an Andesitic Crust as a Possible Origin for Rhyolitic Magma in Oceanic Arcs: An Example from the Izu–Bonin Arc // *Journal of Petrology*. – 2002. – V. 43. – P. 1029-1047.

Taran Yu.A., Hedenquist J.W., Korzhinsky M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I. Geochemistry of magmatic gases from Kudryavy Volcano, Iturup, Kuril Islands // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1995. - V. 59. – № 9. - P. 1749-1761.

Tassi F., Capecchiacci F., Cabassi J., Calabrese S., Vaselli O., Rouwet D., Pecoraino G., Chiodinid G. Geogenic and atmospheric sources for volatile organic compounds in fumarolic emissions from Mt. Etna and Vulcano Island (Sicily, Italy) // *Journal of Geophysical Research.* – 2012. – V. 117. D17305, doi:10.1029/2012JD017642.

Treiman A.H. Rhönite in Luna 24 pyroxenes: First find from the Moon, and implications for volatiles in planetary magmas // *American Mineralogist.* – 2008. – V. 93. – P. 488–491.

Van Keken P.E., Kiefer B., Peacock S.M. High-resolution models of subduction zones: Implications for mineral dehydration reactions and the transport of water into the deep mantle // *Geochemistry. Geophysics. Geosystems.* - 2002. - V. 3. doi: 10.1029/2001GC000256.

Volk H., Fuentes D., Fuerbach A., Miese C., Koehler W., Barsch N., Barcikowski S. First on-line analysis of petroleum from single inclusion using ultrafast laser ablation // *Organic Geochemistry.* – 2010. – V. 41. - P. 74-77.

Volynets O. N., Ponomareva V. V., Braitseva O. A., Melekestsev I. V., Chen C. H. Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* – 1999. V. – 91. - № 1. – P. 23-42.

Wan Z., Coogan L.A., Canil D. Experimental calibration of aluminum partitioning between olivine and spinel as a geothermometer // *American Mineralogist.* - 2008. - V. 93. - P. 1142–1147.

Whiticar M.J., Suess E. Hydrothermal hydrocarbon gases in the sediments of the King George Basin, Bransfield Strait, Antarctica // *Applied Geochemistry*. – 1990. - V. 5 (1-2). - P. 135-147.

Williams M., Ambrose S.H., van der Kaars S., Ruehlemann C., Chattopadhyaya U., Pal J., Chauhan P.R. Environmental Impact of the 73ka Toba super eruption in South Asia // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2009. – V. 284. - № 3–4. – P. 295-314.

Wojdyr M. Fityk: a general-purpose peak fitting program // *Journal of Applied Crystallography*. - 2010. - V. 43. - P. 1126-1128.

Yoshida T. 1984. Tertiary Ishizuchi Cauldron, Southwestern Japan Arc: formation by Ring Fracture Subsidence // *Journal of Geophysical Research*. – 1984. – V. 89. – P. 8502–8510.

Yudovskaya M.A., Tesselina S., Distler V.V., Chaplygin I.V., Chugaev A.V., Dikov Y.P. Behavior of highly-siderophile elements during magma degassing: A case study at the Kudryavy volcano // *Chemical Geology*. – 2008. – V. 248. - № 3-4. - P. 318-341.

Zolotov M. Y., Shock E.L. A thermodynamic assessment of the potential synthesis of condensed hydrocarbons during cooling and dilution of volcanic gases // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – V. 105. - B1. - P. 539–559.

Список публикаций автора

Статьи в рецензируемых изданиях:

Низаметдинов И.Р. Оценки влияния воды на состав остаточных стекол расплавных включений в оливине в базальтах вулкана Меньший Брат, кальдера

Медвежья (о. Итуруп) // Международный научно-исследовательский журнал. - 2022. – Т. 5. - № 1. - С. 135-141.

Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З. Рыбин А.В., Кулаков И.Ю. Вода в родоначальных базальтовых магмах вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Курильские острова) // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 486. - № 1. - С. 93-97.

Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З., Бульбак Т.А., Томиленко А.А., Максимович И.А., Котов А.А. Углеводороды в составе магматогенного флюида во вкрапленниках продуктов извержений вулкана Меньший Брат (о. Итуруп) по данным беспиролизной ГХ-МС расплавных и флюидных включений // Геология и Геофизика. – 2022. – Т. 63. - №. 8. – С. 1075-1087.

Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Признаки смешения магм при образовании базальтов вулкана Меньший Брат по данным о составе клинопироксена // Вопросы естествознания. - 2018. – Т. 3. - № 17. - С. 106-111.

Smirnov S.Z., A.V. Rybin A.V., Kruk N.N., Timina T.Yu., Sokolova E.N., Kuzmin D.V., Maksimovich I.A., Kotov A.A., Shevko A.Ya., **Nizametdinov I.R.**, Abersteiner A. Parental Melts and Magma Storage of a Large-volume Dacite Eruption at Vetrovoy Isthmus (Iturup Island, Southern Kuril Islands): Insights into the Genesis of Subduction-zone Dacites) // Journal of Petrology. - 2019. – V 60. - P. 1349-1370.

Smirnov S.Z., **Nizametdinov I.R.**, Timina T.Yu, 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. - 2021. – V. 418. – 107346. 10.1016/j.jvolgeores.2021.107346

Тезисы докладов Всероссийских и Международных конференций:

Кузьмин Д.В., Низаметдинов И.Р., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю., Шевко А.Я., Рыбин А.В. Происхождение и эволюция основных магм вулкана Меньший Брат (кальдера Медвежья, о. Итуруп) // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии, посвященной 80-летию со дня рождения д-ра геол.-минерал. наук Феликса Григорьевича Рейфа (1936–2008). – 2016. – С. 84-86.

Низаметдинов И.Р. Особенности состава расплавных включений в пироксенах и плагиоклазе в базальтах вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Большая Курильская дуга) //МНСК-2017: Геология. – 2017. – С. 80-80.

Низаметдинов И. Р. Состав оливина, как источник первичной информации о происхождении базальтов вулкана Меньший Брат, о. Итуруп, Большая Курильская гряда //Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Геология. – 2016. – С. 68-68.

Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В. Эволюция магнезиальных базальтов вулкана Меньший Брат: флюидные и расплавные включения во в крапленниках плагиоклаза // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Юрия Александровича Долгова (1918-1993). - 2016. - С. 87-89.

Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З., Секисова В.С. Рёнит-содержащая ассоциация из расплавных включений как индикатор эволюции магнезиальных базальтов вулкана Меньший Брат (о. Итуруп) //Физико-химические факторы петро-и рудогенеза: новые рубежи. – 2019. – С. 130-132.

Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю., Шевко А.Я., Гора М.П., ПРОИСХОЖДЕНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ БАЗАЛЬТОВ ВУЛКАНА МЕНЬШИЙ БРАТ (КАЛЬДЕРА МЕДВЕЖЬЯ, О. ИТУРУП) //Петрология магматических и метаморфических комплексов. – 2017. – С. 333-338.

Смирнов С.З., **Низаметдинов И.Р.,** Кузьмин Д.В., Рыбин А.В., Тимина Т.Ю., Шевко А.Я., Гора М.П. Сульфидные расплавы в очагах посткальдерных вулканов кальдеры Медвежьей и возможные причины образования уникальной рениевой

минерализации в кратере вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские о-ва) // Петрология и рудоносность магматических формаций : материалы науч. конф., посв. памяти чл.- корр. АН СССР и РАН Г. В. Полякова и проф. А. Г. Владимирова. - 2022. – С. 176-178.

Nizametdinov I.R. Composition of olivine and its inclusions as the primary source of information about the origin of basalts of volcano Menshiy Brat, Iturup Island, Southern Kurile Islands // The 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference. - 2016. - P. 57-58.

Nizametdinov I.R. Composition of olivine as the primary source of information about the origin of basalts of volcano Menshiy Brat, Iturup Island, Southern Kurile Islands //Moscow International School of Earth Sciences-2016. – 2016. – С. 91-93.

Nizametdinov I.R. Kuzmin D.V., Smirnov S.Z., Timina T.Yu. Clinopyroxene composition and melt inclusion constrains on the magma mixing and formation of the Menshiy Brat volcano magnesian basalts // 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes. - 2018. - P. 174-175.

Nizametdinov I.R. Kuzmin D.V., Timina T.Yu., Shevko A.Ya., Smirnov S.Z. The features of melt inclusions composition from Menshiy Brat Volcano basalts, Iturup Island, Southern Kurile Islands // European current research on fluid Inclusions 2017 Biennial Meeting. – 2017. – P. 80-80.

Приложение

Табл. 5. Валовые составы вулканических пород, слагающих вулкан Меньший Брат (по данным РФА и ЛА ИСП МС). Оксиды в мас.%, элементы в ppm.

Образец	Посткальдерные лавы																Синкальдерный купол				Синкальдерные пемзы
	MD-1	MD-2	MD-3	MD-4	MD-5	MD-6	MD-7	MD-8	MD-13	MD-14	MD-15	MD-17	MD-18	MD-20	MD-10	MD-11	MD-12	MD-16	MD-22		
SiO ₂	51,55	51,87	51,85	51,76	50,62	53,13	53,01	52,00	52,56	53,03	52,86	53,57	53,31	52,70	62,14	62,85	61,68	60,49	74,55		
TiO ₂	0,70	0,71	0,70	0,71	0,68	0,76	0,75	0,71	0,77	0,75	0,75	0,76	0,75	0,75	0,67	0,67	0,68	0,68	0,44		
Al ₂ O ₃	16,18	16,12	16,15	16,07	16,01	15,94	15,83	16,18	16,27	16,36	16,20	16,14	16,33	16,27	15,76	15,41	15,41	15,93	12,06		
FeOtot	9,99	10,00	9,87	10,05	10,15	10,05	9,92	10,07	10,01	9,92	10,04	9,91	9,71	9,98	6,75	7,11	7,31	7,69	2,93		
MnO	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,14	0,14	0,15	0,15	0,08		
MgO	8,23	8,34	7,99	8,34	9,32	7,49	7,25	8,27	7,16	7,01	7,29	6,63	6,70	7,18	2,43	2,67	2,72	2,81	0,64		
CaO	9,84	9,96	9,74	9,92	10,27	9,38	9,35	9,88	9,77	9,68	9,64	9,41	9,54	9,64	5,70	5,79	5,89	6,38	2,34		
Na ₂ O	2,09	2,12	2,14	2,16	1,99	2,28	2,33	2,14	2,26	2,17	2,29	2,39	2,40	2,34	3,34	3,32	3,23	3,32	3,78		
K ₂ O	0,42	0,44	0,44	0,44	0,38	0,51	0,52	0,44	0,46	0,46	0,47	0,51	0,50	0,48	1,06	0,93	0,95	0,85	1,58		
P ₂ O ₅	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08	0,06	0,09	0,09	0,10	0,05		
BaO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04		
п.п.п.	-0,17	-0,31	0,00	-0,29	-0,33	-0,28	-0,29	-0,26	-0,35	-0,21	-0,30	-0,29	-0,28	-0,22	1,44	0,60	1,10	0,56	0,91		
Сумма	99,11	99,51	99,15	99,42	99,35	99,55	98,94	99,69	99,19	99,44	99,51	99,30	99,21	99,40	99,52	99,62	99,24	98,99	99,39		
P	352,3	328,6	401,1	329,9	317,2	336,4	320,8	301,7	333,7	336,6	310,8	302,1	331,0	310,6	243	-	-	509	199		
Sc	36	39	40	41	39	38	38	40	39	41	38	39	39	42	28	-	-	33	13,5		
Ti	4130	4144	4304	4349	4059	4384	4297	4158	4364	4408	4289	4601	4641	4601	3 841	-	-	4 242	2 646		
V	269	273	281	285	281	279	270	273	271	281	269	281	287	287	130	-	-	164	31		
Cr	400	418	390	411	484	314	313	392	310	314	311	271	289	355	10,4	-	-	12,6	5,8		
Mn	1370	1386	1413	1465	1388	1342	1349	1327	1302	1373	1345	1352	1332	1396	1192	-	-	1 336	687		
Co	35	37	36	35	39	33	33	35	32	32	33	31	31	34	12,7	-	-	14,7	3,1		
Ni	120	139	126	125	153	116	103	109	86	89	100	76	71	93	4,4	-	-	8,4	5,4		
Cu	49	58	63	72	69	54	49	53	66	28	52	53	55	39	41	-	-	34	36		
Zn	84	70	77	78	78	79	78	67	90	74	74	71	73	84	56	-	-	62	41		
Rb	7,3	7,5	7,2	7,3	6,1	8,3	8,4	7,5	9,8	7,2	6,8	8,8	8,8	7,8	15,7	-	-	13,3	24		
Sr	279	279	276	271	271	267	267	282	268	258	252	256	274	258	259	-	-	280	149		
Y	19,1	19,4	18,7	19,0	17,1	21	21	18,8	21	20	20	22	23	21	25	-	-	23	35		
Zr	49	48	50	48	41	55	55	51	55	54	53	59	60	55	95	-	-	79	145		
Nb	0,65	0,57	0,50	0,54	0,47	0,65	0,54	0,61	0,54	0,50	0,43	0,57	0,54	0,57	1,11	-	-	0,86	1,44		
Mo	1,44	1,58	1,42	1,53	2,1	1,74	1,70	1,62	2,1	1,58	1,70	1,75	1,39	1,78	1,47	-	-	1,10	2,4		
Sn	1,45	0,75	1,78	0,69	0,71	0,58	0,70	0,56	0,86	0,79	0,64	0,84	0,62	0,85	0,91	-	-	0,72	2,2		

Примечание: "-" - не определялось.

Табл. 5. (Продолжение)

Образец	Посткальдерные лавы															Синкальдерный купол					Синкальдерные пемзы
	MD-1	MD-2	MD-3	MD-4	MD-5	MD-6	MD-7	MD-8	MD-13	MD-14	MD-15	MD-17	MD-18	MD-20	MD-10	MD-11	MD-12	MD-16	MD-22		
Sb	0,43	0,20	0,22	0,20	0,17	0,20	0,19	0,22	0,20	0,20	0,24	0,24	0,19	0,20	0,34	-	-	0,34	0,72		
Cs	0,58	0,61	0,51	0,54	0,47	0,54	0,51	0,61	0,64	0,47	0,54	0,64	0,64	0,68	1,50	-	-	1,25	2,2		
Ba	115	117	115	116	103	130	127	119	115	121	115	127	128	116	246	-	-	212	358		
La	3,3	3,2	3,1	3,1	2,9	3,4	3,4	3,1	3,0	3,1	2,9	3,3	3,4	2,9	5,5	-	-	5,2	8,4		
Ce	8,5	8,7	8,2	8,2	7,5	9,2	8,8	8,3	8,4	8,4	8,3	9,1	9,1	8,1	15,3	-	-	12,4	20,0		
Pr	1,28	1,33	1,25	1,25	1,20	1,50	1,40	1,20	1,23	1,40	1,20	1,45	1,35	1,30	2,1	-	-	2,0	3,1		
Nd	6,3	6,3	6,7	6,2	6,1	7,2	6,8	6,0	6,1	6,7	6,1	6,9	7,0	6,3	9,3	-	-	9,8	13,2		
Sm	2,2	2,1	1,90	2,1	1,99	2,2	2,2	1,85	2,1	2,3	2,1	2,2	2,4	2,1	3,1	-	-	3,0	4,0		
Eu	0,64	0,67	0,67	0,67	0,64	0,70	0,70	0,67	0,70	0,73	0,70	0,70	0,64	0,67	0,89	-	-	0,95	0,79		
Gd	2,5	2,9	2,6	2,7	2,3	2,8	2,6	2,4	2,7	2,7	3,0	2,9	3,2	2,8	3,8	-	-	3,6	4,9		
Tb	0,49	0,46	0,49	0,44	0,41	0,49	0,52	0,47	0,47	0,52	0,46	0,55	0,54	0,52	0,67	-	-	0,64	0,86		
Dy	3,3	3,3	3,2	3,1	2,9	3,3	3,3	3,2	3,3	3,5	3,4	3,6	3,6	3,4	4,3	-	-	4,1	5,7		
Ho	0,74	0,74	0,71	0,70	0,63	0,77	0,74	0,69	0,72	0,80	0,71	0,80	0,77	0,78	0,97	-	-	0,86	1,29		
Er	2,1	2,0	2,00	2,1	1,80	2,3	2,2	2,0	2,2	2,3	2,1	2,4	2,4	2,2	2,9	-	-	2,6	4,0		
Tm	0,30	0,32	0,31	0,34	0,28	0,34	0,32	0,31	0,34	0,34	0,31	0,36	0,36	0,34	0,46	-	-	0,43	0,65		
Yb	1,94	2,1	1,90	2,1	1,77	2,2	2,2	1,94	2,2	2,2	2,0	2,4	2,3	2,2	3,1	-	-	2,8	4,3		
Lu	0,29	0,30	0,30	0,31	0,28	0,33	0,32	0,30	0,35	0,34	0,30	0,36	0,36	0,33	0,47	-	-	0,44	0,68		
Hf	1,46	1,46	1,53	1,57	1,27	1,55	1,52	1,43	1,58	1,54	1,56	1,65	1,70	1,58	3,0	-	-	2,7	4,7		
Ta	<0,05	0,055	<0,05	<0,05	<0,05	0,055	0,064	<0,05	0,055	0,064	0,055	0,060	<0,05	<0,05	0,089	-	-	0,060	0,15		
W	1,86	0,34	3,1	0,67	0,54	0,38	0,39	0,36	0,33	0,43	0,44	0,59	0,37	0,36	0,78	-	-	0,63	1,10		
Pb	16,8	6,4	7,2	5,5	6,9	5,7	5,7	7,7	7,0	8,0	6,2	7,4	6,2	6,7	7,6	-	-	7,0	15,1		
Th	0,70	0,64	0,67	0,64	0,51	0,67	0,73	0,70	0,58	0,57	0,57	0,61	0,60	0,54	1,28	-	-	1,01	1,98		
U	0,24	0,24	0,24	0,22	0,24	0,30	0,27	0,22	0,24	0,27	0,24	0,35	0,24	0,24	0,63	-	-	0,51	0,96		

Примечание: "-" - не определялось.

Табл. 6. Состав ликвидусной шпинели и оливина-хозяина из базальтов в. Меньший Брат (мас. %).

Номер анализа	MD3-1-1	MD3-6-1	MD3-5-1	MD3-5-2	MD3-2-1	MD3-14-1	MD3-14-2	MD3-13-1	MD3-11-1	MD3-10-1	MD3-24-1
TiO ₂	0,42	0,34	0,39	0,35	0,42	0,37	0,42	0,37	0,37	0,35	0,41
Al ₂ O ₃	19,93	18,70	20,91	20,99	21,50	20,61	20,82	18,92	19,84	19,42	19,83
Cr ₂ O ₃	37,05	36,67	38,68	38,73	37,57	38,46	38,53	39,21	39,74	39,04	38,26
FeO	26,17	29,26	24,42	24,41	25,39	24,85	24,78	28,30	24,65	26,49	26,52
MnO	0,216	0,228	0,221	0,224	0,219	0,212	0,219	0,271	0,225	0,217	0,234
MgO	13,98	12,10	13,00	13,02	12,83	12,94	12,89	11,34	12,97	12,49	12,17
NiO	0,208	0,225	0,222	0,214	0,177	0,21	0,215	0,114	0,22	0,21	0,181
V ₂ O ₃	0,131	0,141	0,161	0,137	0,144	0,152	0,144	0,137	0,137	0,136	0,153
Сумма	98,86	98,14	98,14	98,23	98,44	98,12	98,10	98,73	98,22	98,44	97,85
Mg#	0,631	0,565	0,605	0,605	0,593	0,599	0,601	0,535	0,607	0,586	0,573
Cr#	0,555	0,568	0,554	0,553	0,540	0,556	0,554	0,582	0,573	0,574	0,564
Log(fO ₂)	-6,84	-6,40	-6,65	-6,53	-7,08	-6,80	-6,73	-8,64	-6,38	-6,52	-7,36
оливин-хозяин											
SiO ₂	40,17	40,40	40,48	40,49	40,47	40,21	40,38	40,10	40,75	40,13	40,45
TiO ₂	0,005	0,005	0,005	0,007	0,002	0,005	0,005	0,006	0,003	0,005	0,002
Al ₂ O ₃	0,023	0,023	0,024	0,024	0,026	0,026	0,022	0,019	0,025	0,022	0,023
FeO	11,12	10,95	10,59	10,46	11,18	10,75	10,73	12,95	10,37	10,74	11,61
MnO	0,179	0,175	0,167	0,168	0,175	0,172	0,171	0,212	0,162	0,169	0,183
MgO	47,94	48,05	48,41	48,50	48,19	48,13	48,31	46,76	48,56	48,24	47,91
CaO	0,150	0,144	0,140	0,144	0,141	0,143	0,144	0,168	0,142	0,144	0,154
NiO	0,284	0,313	0,338	0,339	0,304	0,323	0,322	0,176	0,353	0,328	0,266
CoO	0,017	0,018	0,018	0,016	0,017	0,016	0,017	0,016	0,018	0,017	0,018
Cr ₂ O ₃	0,045	0,052	0,066	0,07	0,043	0,059	0,056	0,033	0,057	0,043	0,041
Сумма	99,94	100,12	100,23	100,21	100,55	99,84	100,15	100,44	100,44	99,84	100,66
Fo	88,48	88,67	89,07	89,21	88,48	88,86	88,93	86,56	89,30	88,89	88,03
T °C	1219	1231	1255	1263	1219	1242	1246	1104	1269	1244	1192

Примечание: фугитивность кислорода по (Ballhaus et al., 1991), температура равновесия рассчитана по (Cogan et al., 2014).

Табл. 6. (Продолжение)

Номер анализа	MD3-24-2	MD3-34-1	MD3-34-2	MD3-30-1	MD3-30-2	MD5-2-3	MD5-4-1	MD5-14-1	MD5-19-1	MD5-21-1	MD5-21-2
TiO ₂	0,44	0,38	0,33	0,36	0,39	0,38	0,41	0,36	0,37	0,38	0,38
Al ₂ O ₃	20,15	18,02	19,42	19,95	19,76	19,63	18,71	19,53	19,22	20,38	20,26
Cr ₂ O ₃	38,59	36,01	38,02	39,66	38,87	38,72	38,21	39,35	38,97	39,08	39,06
FeO	25,96	29,27	25,80	25,29	25,70	25,34	27,87	25,98	26,33	24,63	24,56
MnO	0,23	0,247	0,225	0,217	0,208	0,203	0,224	0,209	0,224	0,215	0,198
MgO	12,48	12,10	13,53	12,84	13,98	13,54	12,69	13,17	13,26	13,48	14,50
NiO	0,19	0,169	0,228	0,192	0,195	0,212	0,164	0,186	0,182	0,202	0,212
V ₂ O ₃	0,151	0,149	0,15	0,159	0,147	0,163	0,133	0,127	0,142	0,178	0,143
Сумма	98,31	96,57	97,96	98,73	99,62	98,91	98,48	98,98	98,83	98,62	99,59
Mg#	0,583	0,577	0,630	0,598	0,635	0,614	0,595	0,612	0,616	0,625	0,658
Cr#	0,562	0,573	0,568	0,571	0,569	0,570	0,578	0,575	0,576	0,563	0,564
Log(fO ₂)	-7,20	-6,40	-6,10	-6,85	-6,78	-7,09	-7,63	-7,26	-7,23	-7,11	-7,05
оливин-хозяин											
SiO ₂	40,55	40,24	40,51	40,44	40,62	40,38	40,63	40,55	40,39	40,74	40,79
TiO ₂	0,004	0,005	0,004	0,003	0,004	0,005	0,004	0,004	0,005	0,003	0,006
Al ₂ O ₃	0,022	0,024	0,025	0,026	0,024	0,024	0,027	0,022	0,025	0,026	0,029
FeO	11,38	11,02	10,39	10,96	11,09	11,24	12,22	11,57	11,57	11,27	11,31
MnO	0,180	0,175	0,163	0,174	0,178	0,178	0,198	0,185	0,185	0,181	0,180
MgO	48,09	48,06	48,68	48,28	48,34	48,09	47,76	48,00	47,77	48,34	48,36
CaO	0,156	0,146	0,137	0,153	0,147	0,151	0,158	0,157	0,152	0,152	0,152
NiO	0,277	0,307	0,348	0,300	0,298	0,300	0,224	0,269	0,275	0,302	0,294
CoO	0,018	0,016	0,016	0,016	0,018	0,017	0,018	0,019	0,017	0,017	0,017
Cr ₂ O ₃	0,078	0,051	0,059	0,106	0,081	0,047	0,041	0,042	0,038	0,056	0,059
Сумма	100,77	100,05	100,33	100,46	100,80	100,42	101,28	100,82	100,42	101,08	101,20
Fo	88,28	88,60	89,31	88,71	88,60	88,41	87,45	88,09	88,04	88,44	88,40
T °C	1207	1226	1269	1233	1226	1215	1157	1195	1193	1217	1214

Примечание: фугитивность кислорода по (Ballhaus et al., 1991), температура равновесия рассчитана по (Cogan et al., 2014).

Табл. 6. (Продолжение)

Номер анализа	MD5-24-1	MD17-2-1	MD17-8-1	MD17-9-1	MD17-10-1	MD17-14-1	MD17-14-2	MD17-23-1	MD17-24-1	MD17-24-2
TiO ₂	0,36	0,33	0,31	0,53	0,52	0,31	0,33	0,56	0,34	0,50
Al ₂ O ₃	21,53	21,38	21,32	20,81	24,54	20,58	20,55	21,84	20,58	19,46
Cr ₂ O ₃	40,47	41,51	40,77	36,88	31,91	42,01	42,58	34,27	41,09	37,08
FeO	22,34	20,50	22,22	28,08	27,40	21,60	21,79	27,52	22,70	31,14
MnO	0,19	0,182	0,199	0,255	0,219	0,202	0,184	0,238	0,202	0,285
MgO	14,10	14,10	13,55	12,11	13,08	13,80	13,79	13,51	13,39	10,06
NiO	0,231	0,214	0,179	0,106	0,149	0,192	0,188	0,136	0,176	0,09
V ₂ O ₃	0,155	0,136	0,178	0,195	0,189	0,143	0,122	0,207	0,151	0,162
Сумма	99,45	98,41	98,78	98,98	98,20	98,89	99,59	98,34	98,72	98,79
Mg#	0,644	0,651	0,626	0,562	0,594	0,638	0,634	0,620	0,620	0,477
Cr#	0,558	0,566	0,562	0,543	0,466	0,578	0,582	0,513	0,573	0,561
Log(fO ₂)	-6,84	-6,62	-7,35	-8,98	-8,56	-6,99	-6,73	-8,76	-7,27	-9,13
оливин-хозяин										
SiO ₂	40,51	40,34	40,32	39,93	40,04	40,35	40,44	39,90	40,24	39,89
TiO ₂	0,003	0,003	0,001	0,003	0,005	0,006	0,001	0,007	0,005	0,004
Al ₂ O ₃	0,026	0,028	0,026	0,023	0,022	0,026	0,026	0,023	0,029	0,020
FeO	10,55	9,95	10,96	13,33	12,89	10,47	10,23	13,13	10,92	13,57
MnO	0,167	0,154	0,170	0,214	0,208	0,161	0,158	0,205	0,171	0,219
MgO	48,50	48,92	48,17	46,60	46,77	48,26	48,59	46,36	48,01	46,20
CaO	0,142	0,156	0,155	0,193	0,172	0,162	0,162	0,173	0,161	0,187
NiO	0,341	0,358	0,288	0,158	0,185	0,308	0,334	0,175	0,318	0,157
CoO	0,018	0,016	0,017	0,018	0,019	0,016	0,016	0,02	0,017	0,016
Cr ₂ O ₃	0,05	0,058	0,043	0,041	0,071	0,072	0,052	0,065	0,054	0,026
Сумма	100,30	99,99	100,15	100,52	100,38	99,83	100,01	100,06	99,93	100,28
Fo	89,13	89,76	88,68	86,17	86,61	89,15	89,44	86,29	88,69	85,86
T °C	1258	1296	1231	1080	1107	1259	1277	1088	1232	1062

Примечание: фугитивность кислорода по (Ballhaus et al., 1991), температура равновесия рассчитана по (Cogan et al., 2014).

Табл. 6. (Продолжение)

Номер анализа	MD17-29-1	MD17-30-1	MD17-30-2	MD13-1-1	MD13-11-1	MD13-12-1	MD13-12-2	MD13-12-3	MD13-15-1	MD13-17-1
TiO ₂	0,39	0,63	0,46	0,40	0,35	0,50	0,40	0,35	0,43	0,60
Al ₂ O ₃	22,44	20,59	24,99	21,48	24,59	24,77	21,44	21,46	20,88	23,90
Cr ₂ O ₃	38,78	33,05	32,89	39,60	36,81	34,45	39,74	38,80	37,85	31,82
FeO	22,47	32,31	25,85	22,63	22,23	26,27	23,85	22,19	24,93	31,62
MnO	0,198	0,269	0,215	0,206	0,189	0,238	0,216	0,197	0,224	0,288
MgO	13,69	10,75	13,54	14,20	13,97	13,14	13,08	13,10	12,52	10,85
NiO	0,183	0,099	0,161	0,212	0,217	0,165	0,166	0,192	0,147	0,112
V ₂ O ₃	0,152	0,191	0,167	0,14	0,143	0,183	0,15	0,145	0,174	0,226
Сумма	98,37	97,97	98,33	98,94	98,55	99,78	99,10	97,13	97,22	99,47
Mg#	0,630	0,505	0,616	0,650	0,636	0,592	0,603	0,602	0,589	0,498
Cr#	0,537	0,518	0,469	0,553	0,501	0,483	0,554	0,548	0,549	0,472
Log(fO ₂)	-7,05	-9,37	-8,05	-6,58	-7,38	-8,14	-6,96	-7,25	-7,76	-9,25
оливин-хозяин										
SiO ₂	40,42	40,03	40,32	40,80	40,44	40,30	40,44	40,27	40,13	39,84
TiO ₂	0,004	0,004	0,007	0,003	0,003	0,002	0,005	0,003	0,006	0,004
Al ₂ O ₃	0,026	0,028	0,023	0,026	0,027	0,022	0,024	0,026	0,025	0,023
FeO	10,68	14,04	12,23	10,42	11,04	12,34	10,79	10,65	11,79	13,75
MnO	0,169	0,226	0,194	0,167	0,170	0,195	0,166	0,166	0,186	0,225
MgO	48,21	46,06	47,12	48,81	48,23	47,36	48,40	48,41	47,72	46,09
CaO	0,162	0,186	0,174	0,150	0,161	0,172	0,160	0,162	0,168	0,191
NiO	0,292	0,150	0,205	0,318	0,286	0,207	0,305	0,305	0,240	0,148
CoO	0,016	0,017	0,018	0,017	0,016	0,017	0,017	0,016	0,017	0,02
Cr ₂ O ₃	0,045	0,025	0,029	0,058	0,06	0,04	0,052	0,071	0,028	0,038
Сумма	100,02	100,77	100,32	100,77	100,44	100,66	100,36	100,07	100,32	100,33
Fo	88,95	85,40	87,29	89,31	88,62	87,25	88,89	89,01	87,83	85,66
T °C	1247	1034	1148	1269	1227	1145	1244	1251	1180	1050

Примечание: фугитивность кислорода по (Ballhaus et al., 1991), температура равновесия рассчитана по (Cogan et al., 2014).

Табл. 6. (Продолжение)

Номер анализа	MD13-17-2	MD13-18-1	MD13-18-2	MD13-21-1	MD13-22-1	MD13-23-1	MD13-23-2	MD13-24-1	MD13-24-2	MD13-24-3
TiO ₂	0,61	0,54	0,54	0,43	0,36	0,39	0,42	0,60	0,49	0,40
Al ₂ O ₃	21,81	23,32	21,24	23,95	21,39	21,56	23,23	22,53	21,62	19,95
Cr ₂ O ₃	35,22	34,57	35,87	37,86	41,80	40,59	35,80	35,19	36,06	37,80
FeO	28,36	27,31	29,00	23,33	22,26	23,84	26,26	27,23	29,56	29,12
MnO	0,248	0,225	0,253	0,205	0,211	0,215	0,229	0,231	0,272	0,263
MgO	12,11	12,49	11,71	13,23	13,47	12,73	12,65	12,01	11,51	11,37
NiO	0,127	0,15	0,114	0,166	0,187	0,169	0,149	0,131	0,118	0,108
V ₂ O ₃	0,207	0,186	0,185	0,165	0,151	0,159	0,153	0,2	0,177	0,167
Сумма	98,75	98,83	98,96	99,45	99,89	99,71	98,94	98,20	99,83	99,22
Mg#	0,559	0,572	0,543	0,600	0,617	0,585	0,580	0,556	0,531	0,532
Cr#	0,520	0,499	0,531	0,515	0,567	0,558	0,508	0,512	0,528	0,560
Log(fO ₂)	-8,24	-8,29	-8,45	-7,86	-7,16	-7,76	-8,76	-8,17	-9,65	-9,79
оливин-хозяин										
SiO ₂	40,08	40,14	39,87	40,19	40,12	40,29	40,18	40,07	39,83	39,83
TiO ₂	0,004	0,003	0,004	0,001	0,004	0,003	0,005	0,005	0,004	0,004
Al ₂ O ₃	0,025	0,021	0,023	0,025	0,029	0,026	0,022	0,026	0,022	0,021
FeO	12,62	12,59	12,82	11,51	10,61	11,45	12,88	12,36	13,98	14,06
MnO	0,204	0,201	0,204	0,181	0,167	0,181	0,202	0,196	0,227	0,233
MgO	46,96	47,16	46,63	47,77	48,05	47,76	46,82	47,11	45,98	45,89
CaO	0,178	0,169	0,175	0,165	0,162	0,165	0,172	0,172	0,186	0,190
NiO	0,188	0,204	0,197	0,268	0,301	0,263	0,206	0,214	0,151	0,139
CoO	0,02	0,019	0,017	0,018	0,016	0,019	0,018	0,016	0,018	0,018
Cr ₂ O ₃	0,025	0,03	0,033	0,079	0,059	0,047	0,026	0,03	0,068	0,031
Сумма	100,30	100,54	99,96	100,20	99,51	100,20	100,53	100,20	100,47	100,41
Fo	86,90	86,98	86,64	88,10	88,98	88,14	86,63	87,17	85,44	85,34
T °C	1124	1129	1109	1196	1249	1199	1108	1140	1036	1030

Примечание: фугитивность кислорода по (Ballhaus et al., 1991), температура равновесия рассчитана по (Cogan et al., 2014).

Табл. 6. (Продолжение)

Номер анализа	MD13-25-1	MD13-26-1	MD13-26-2	MD13-26-3	MD13-26-4	MD13-28-1	MD13-29-1	MD13-29-2	MD13-29-3	MD13-32-1
TiO ₂	0,42	0,45	0,44	0,66	0,58	0,42	0,46	0,45	0,41	0,43
Al ₂ O ₃	23,62	23,25	21,36	24,39	23,53	23,69	20,20	22,78	20,61	25,62
Cr ₂ O ₃	36,32	36,74	39,23	31,85	32,64	34,79	37,53	36,55	39,43	33,73
FeO	25,08	24,99	25,12	29,47	28,55	26,69	29,27	26,05	26,15	26,49
MnO	0,206	0,194	0,222	0,233	0,223	0,233	0,273	0,216	0,242	0,21
MgO	13,09	13,10	12,88	12,58	12,43	12,67	11,42	12,66	12,36	13,15
NiO	0,165	0,168	0,162	0,125	0,126	0,16	0,096	0,139	0,135	0,141
V ₂ O ₃	0,168	0,153	0,164	0,224	0,19	0,176	0,171	0,189	0,133	0,18
Сумма	99,11	99,09	99,65	99,57	98,34	98,90	99,47	99,08	99,53	100,01
Mg#	0,597	0,598	0,591	0,568	0,570	0,580	0,532	0,581	0,572	0,590
Cr#	0,508	0,515	0,552	0,467	0,482	0,496	0,555	0,518	0,562	0,469
Log(fO ₂)	-7,67	-7,53	-7,62	-8,77	-8,77	-8,49	-9,60	-8,53	-8,71	-8,43
оливин-хозяин										
SiO ₂	40,46	40,22	40,28	39,88	39,92	39,94	39,99	40,13	40,19	40,12
TiO ₂	0,006	0,005	0,003	0,002	0,004	0,004	0,002	0,004	0,006	0,003
Al ₂ O ₃	0,026	0,025	0,024	0,024	0,020	0,026	0,023	0,024	0,022	0,023
FeO	11,66	11,55	11,63	13,28	13,17	12,62	13,93	12,64	12,83	12,62
MnO	0,185	0,183	0,185	0,216	0,211	0,203	0,226	0,204	0,210	0,199
MgO	47,61	47,85	47,73	46,51	46,51	46,71	46,09	47,03	47,04	47,07
CaO	0,167	0,170	0,166	0,191	0,188	0,170	0,189	0,174	0,177	0,173
NiO	0,242	0,250	0,254	0,163	0,164	0,219	0,147	0,203	0,190	0,197
CoO	0,017	0,017	0,018	0,019	0,019	0,018	0,018	0,017	0,018	0,017
Cr ₂ O ₃	0,034	0,064	0,04	0,031	0,057	0,029	0,026	0,03	0,036	0,029
Сумма	100,41	100,33	100,33	100,31	100,26	99,94	100,64	100,46	100,72	100,45
Fo	87,92	88,08	87,98	86,20	86,30	86,84	85,51	86,90	86,73	86,92
T °C	1185	1195	1189	1082	1088	1120	1041	1124	1114	1126

Примечание: фугитивность кислорода по (Ballhaus et al., 1991), температура равновесия рассчитана по (Cogan et al., 2014).

Табл. 6. (Продолжение)

Номер анализа	MD13-32-2	MD13-34-1	MD13-34-2	MD13-36-1	MD13-37-1	MD13-39-1	MD13-40-1	MD13-41-1	MD13-42-1	MD13-42-3
TiO ₂	0,38	0,46	0,39	0,48	0,40	0,51	0,45	0,36	0,39	0,36
Al ₂ O ₃	24,90	22,25	21,92	22,80	20,83	21,03	20,55	23,74	21,31	20,71
Cr ₂ O ₃	36,68	37,05	39,36	37,82	39,32	35,74	39,15	37,35	39,97	41,81
FeO	23,65	26,25	24,92	25,31	26,15	31,67	25,37	23,10	23,62	22,97
MnO	0,207	0,229	0,227	0,224	0,238	0,289	0,229	0,188	0,205	0,204
MgO	13,53	12,50	12,92	12,76	12,03	10,41	12,37	13,53	13,09	13,32
NiO	0,185	0,149	0,158	0,154	0,124	0,079	0,141	0,189	0,184	0,182
V ₂ O ₃	0,157	0,193	0,173	0,2	0,159	0,176	0,175	0,171	0,144	0,135
Сумма	99,71	99,14	100,13	99,88	99,31	99,95	98,49	98,71	98,98	99,75
Mg#	0,611	0,575	0,590	0,580	0,558	0,484	0,577	0,618	0,604	0,612
Cr#	0,497	0,528	0,546	0,527	0,559	0,533	0,561	0,513	0,557	0,575
Log(fO ₂)	-7,99	-8,33	-7,66	-8,44	-8,37	-7,79	-7,91	-7,36	-7,14	-7,29
оливин-хозяин										
SiO ₂	40,04	40,10	40,17	39,96	40,11	40,01	39,96	40,13	40,24	40,04
TiO ₂	0,006	0,005	0,003	0,005	0,003	0,006	-	0,004	0,003	0,002
Al ₂ O ₃	0,030	0,023	0,025	0,027	0,024	0,027	0,023	0,026	0,022	0,025
FeO	11,72	12,47	11,58	12,35	12,41	12,42	11,89	11,10	10,95	10,99
MnO	0,183	0,201	0,179	0,198	0,200	0,198	0,189	0,175	0,172	0,176
MgO	47,40	47,22	47,59	47,04	47,18	47,20	47,41	48,12	48,34	48,31
CaO	0,166	0,171	0,163	0,171	0,168	0,168	0,177	0,158	0,165	0,159
NiO	0,257	0,204	0,262	0,229	0,220	0,228	0,222	0,283	0,299	0,297
CoO	0,018	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,016	0,017	0,017
Cr ₂ O ₃	0,066	0,028	0,054	0,041	0,042	0,045	0,057	0,042	0,099	0,044
Сумма	99,90	100,44	100,05	100,04	100,37	100,31	99,95	100,06	100,31	100,05
Fo	87,82	87,10	87,99	87,16	87,14	87,14	87,67	88,54	88,73	88,68
T °C	1179	1136	1190	1140	1139	1139	1170	1223	1234	1231

Примечание: фугитивность кислорода по (Ballhaus et al., 1991), температура равновесия рассчитана по (Cogan et al., 2014).

Табл. 6. (Продолжение)

Номер анализа	MD13-43-1	MD13-44-1	MD13-47-1
TiO ₂	0,55	0,50	0,45
Al ₂ O ₃	20,96	23,68	22,86
Cr ₂ O ₃	37,92	34,19	38,68
FeO	27,39	27,44	22,76
MnO	0,246	0,22	0,196
MgO	12,10	12,49	13,65
NiO	0,14	0,144	0,184
V ₂ O ₃	0,185	0,191	0,17
Сумма	99,55	98,89	98,99
Mg#	0,558	0,572	0,623
Cr#	0,548	0,492	0,532
Log(fO ₂)	-8,42	-8,58	-6,84
оливин-хозяин			
SiO ₂	40,01	39,96	40,14
TiO ₂	0,003	-	0,005
Al ₂ O ₃	0,020	0,023	0,027
FeO	12,67	12,87	10,50
MnO	0,202	0,209	0,164
MgO	47,05	46,88	48,50
CaO	0,172	0,180	0,163
NiO	0,196	0,189	0,310
CoO	0,02	0,018	0,017
Cr ₂ O ₃	0,064	0,03	0,052
Сумма	100,40	100,35	99,88
Fo	86,88	86,66	89,17
T °C	1123	1110	1260

Примечание: фугитивность кислорода по (Ballhaus et al., 1991), температура равновесия рассчитана по (Cogan et al., 2014).

Табл. 7. Составы вкрапленников оливина из базальтов вулкана Меньший Брат (мас. %).

Номер анализа	Место анализа	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	NiO	CoO	MnO	CaO	Сумма	Fо, мол. %	T, °C
MD17-1c	ц	40,154	0,001	0,028	0,024	11,852	47,593	0,250	0,017	0,188	0,161	100,27	87,74	1175
MD17-2c	ц	39,959	0,004	0,038	0,029	10,897	46,996	0,289	0,020	0,173	0,162	98,57	88,49	1220
MD17-2r	к	40,664	0,002	0,046	0,027	10,610	48,828	0,327	0,018	0,165	0,154	100,84	89,13	1258
MD17-3c	ц	39,993	0,000	0,026	0,023	12,514	47,027	0,204	0,017	0,199	0,172	100,17	87,01	1131
MD17-3r	к	40,103	0,003	0,024	0,023	12,742	47,052	0,192	0,017	0,204	0,174	100,53	86,81	1119
MD17-4c	ц	39,970	0,002	0,026	0,022	12,430	47,351	0,207	0,019	0,201	0,173	100,40	87,16	1140
MD17-4r	к	39,865	0,004	0,014	0,019	13,956	45,867	0,134	0,020	0,228	0,189	100,30	85,42	1035
MD17-5c	ц	40,291	0,000	0,042	0,027	10,489	48,451	0,309	0,019	0,167	0,163	99,96	89,17	1261
MD17-5r	к	39,911	0,003	0,025	0,022	12,939	46,654	0,189	0,019	0,210	0,179	100,15	86,54	1102
MD17-6c	ц	39,708	0,006	0,021	0,022	13,755	45,950	0,149	0,018	0,224	0,169	100,02	85,62	1047
MD17-6r	к	39,918	0,003	0,020	0,021	13,719	46,066	0,150	0,019	0,223	0,173	100,31	85,69	1051
MD17-7c	ц	40,504	0,003	0,047	0,027	9,656	49,013	0,372	0,018	0,156	0,143	99,94	90,05	1313
MD17-7r	к	40,623	0,003	0,041	0,023	9,872	49,140	0,366	0,017	0,154	0,143	100,38	89,87	1303
MD17-8c	ц	40,310	0,000	0,036	0,022	11,115	48,132	0,273	0,019	0,172	0,153	100,23	88,53	1222
MD17-8r	к	40,092	0,001	0,026	0,021	12,768	46,919	0,213	0,019	0,206	0,174	100,44	86,76	1116
MD17-9c	ц	39,715	0,005	0,025	0,020	13,479	46,225	0,148	0,019	0,223	0,189	100,05	85,94	1067
MD17-9r	к	39,939	0,001	0,022	0,020	13,133	46,571	0,164	0,020	0,215	0,187	100,27	86,34	1091
MD17-10c	ц	40,054	0,003	0,025	0,021	12,795	46,388	0,187	0,018	0,209	0,167	99,87	86,60	1106
MD17-10r	к	39,989	0,005	0,017	0,020	12,981	46,440	0,166	0,020	0,210	0,187	100,03	86,45	1097
MD17-11c	ц	40,250	0,001	0,034	0,023	12,507	46,994	0,221	0,020	0,207	0,174	100,43	87,01	1131
MD17-11r	к	40,414	0,004	0,026	0,023	13,114	46,989	0,176	0,018	0,211	0,179	101,15	86,46	1098
MD17-12c	ц	40,196	0,004	0,033	0,023	11,873	47,432	0,256	0,018	0,185	0,161	100,18	87,69	1171
MD17-13c	ц	39,808	0,001	0,017	0,018	13,750	46,047	0,144	0,019	0,224	0,192	100,22	85,65	1049
MD17-13r	к	39,598	0,004	0,017	0,019	13,868	45,596	0,136	0,021	0,227	0,190	99,68	85,42	1036
MD17-14c	ц	40,455	0,001	0,043	0,024	9,863	49,034	0,348	0,018	0,155	0,153	100,09	89,86	1302
MD17-14r	к	40,493	0,002	0,035	0,022	11,339	48,089	0,264	0,019	0,183	0,170	100,62	88,32	1209
MD17-15c	ц	40,248	0,004	0,026	0,024	12,349	47,154	0,221	0,020	0,195	0,169	100,41	87,19	1142
MD17-16c	ц	40,010	0,002	0,018	0,019	13,229	46,408	0,161	0,019	0,218	0,190	100,27	86,21	1083
MD17-16r	к	39,844	0,004	0,018	0,019	13,916	45,662	0,142	0,020	0,227	0,189	100,04	85,40	1034
MD17-17c	ц	40,051	0,001	0,017	0,023	12,737	46,772	0,182	0,021	0,200	0,177	100,18	86,75	1115
MD17-17r	к	39,890	0,001	0,024	0,019	13,033	46,355	0,180	0,019	0,209	0,180	99,91	86,38	1093
MD17-18c	ц	40,481	0,003	0,047	0,027	9,823	49,263	0,355	0,016	0,150	0,153	100,32	89,94	1307
MD17-18r	к	40,159	0,004	0,037	0,022	11,193	47,720	0,275	0,019	0,177	0,159	99,76	88,37	1213
MD17-19c	ц	40,211	0,003	0,028	0,022	12,530	47,012	0,200	0,018	0,204	0,171	100,40	86,99	1130
MD17-19r	к	40,107	0,004	0,025	0,019	12,704	46,599	0,192	0,019	0,205	0,175	100,05	86,74	1114
MD17-20c	ц	40,381	0,000	0,030	0,025	11,409	48,038	0,252	0,017	0,180	0,166	100,50	88,24	1205
MD17-20r	к	40,099	0,007	0,015	0,021	13,508	46,342	0,151	0,020	0,215	0,192	100,57	85,95	1067
MD15-1c	ц	40,528	0,000	0,037	0,024	10,838	48,459	0,278	0,018	0,169	0,166	100,52	88,85	1241
MD15-1r	к	39,947	0,004	0,020	0,018	13,901	45,599	0,135	0,021	0,228	0,192	100,06	85,40	1034
MD15-2c	ц	40,668	0,000	0,037	0,027	9,948	49,097	0,366	0,019	0,152	0,162	100,48	89,79	1298
MD15-2r	к	40,438	0,001	0,031	0,022	12,429	47,349	0,213	0,018	0,195	0,168	100,86	87,16	1140
MD15-3c	ц	39,939	0,004	0,024	0,019	12,895	46,730	0,181	0,018	0,206	0,176	100,19	86,60	1106
MD15-3r	к	39,819	0,005	0,024	0,020	13,732	46,056	0,150	0,020	0,222	0,186	100,23	85,67	1050
MD15-4c	ц	40,479	0,004	0,041	0,023	10,722	48,190	0,289	0,018	0,167	0,162	100,09	88,90	1245
MD15-4r	к	40,120	0,005	0,033	0,028	11,929	47,399	0,239	0,019	0,189	0,174	100,13	87,63	1168
MD15-5c	ц	40,390	0,001	0,048	0,026	9,743	48,891	0,349	0,016	0,152	0,152	99,77	89,94	1307
MD15-5r	к	39,942	0,007	0,031	0,025	12,909	46,536	0,237	0,019	0,205	0,165	100,08	86,53	1102
MD15-6c	ц	40,281	0,005	0,035	0,023	11,264	47,910	0,255	0,018	0,179	0,169	100,14	88,35	1211
MD15-6r	к	40,340	0,002	0,030	0,022	12,220	47,341	0,216	0,018	0,195	0,173	100,56	87,35	1151
MD15-7c	ц	39,863	0,004	0,018	0,018	13,521	46,296	0,152	0,019	0,217	0,170	100,28	85,92	1066
MD15-7r	к	39,857	0,004	0,020	0,021	14,865	45,220	0,125	0,020	0,240	0,193	100,57	84,43	976
MD15-8c	ц	40,282	0,003	0,023	0,027	12,237	47,424	0,214	0,020	0,190	0,170	100,59	87,36	1152
MD15-9c	ц	40,148	0,003	0,048	0,024	12,361	47,331	0,211	0,018	0,199	0,173	100,52	87,22	1144
MD15-9r	к	39,851	0,004	0,019	0,021	14,124	45,895	0,131	0,020	0,233	0,196	100,49	85,28	1027
MD15-10c	ц	40,564	0,006	0,034	0,027	10,875	48,327	0,298	0,019	0,167	0,158	100,47	88,79	1238
MD15-10r	к	40,219	0,002	0,044	0,027	10,421	48,136	0,321	0,018	0,161	0,155	99,50	89,17	1261
MD15-11c	ц	40,388	0,004	0,025	0,022	12,807	46,785	0,182	0,020	0,210	0,177	100,62	86,69	1111
MD15-12c	ц	41,053	0,001	0,050	0,024	10,028	49,268	0,341	0,018	0,155	0,156	101,09	89,75	1295
MD15-12r	к	40,126	0,001	0,028	0,022	13,010	46,575	0,227	0,021	0,208	0,169	100,39	86,45	1097
MD15-13c	ц	40,373	0,004	0,025	0,021	12,333	46,797	0,198	0,019	0,195	0,170	100,13	87,12	1137
MD15-13r	к	40,010	0,003	0,023	0,020	12,889	46,884	0,176	0,018	0,211	0,179	100,41	86,64	1109

Примечание: ц - центр кристалла, к - край кристалла. Температура рассчитана по (Ford et al., 1983).

Табл. 7. (Продолжение)

Номер анализа	Место анализа	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	NiO	CoO	MnO	CaO	Total	Fe, мол. %	T, °C
MD15-14c	ц	40,804	0,002	0,038	0,025	10,586	48,609	0,304	0,018	0,170	0,158	100,71	89,11	1257
MD15-14r	к	40,027	0,002	0,021	0,024	13,197	46,306	0,161	0,019	0,213	0,184	100,15	86,22	1083
MD15-15c	ц	40,253	0,001	0,025	0,023	12,325	47,498	0,196	0,019	0,200	0,177	100,72	87,29	1148
MD15-15r	к	39,918	0,005	0,021	0,017	15,008	44,595	0,113	0,021	0,254	0,196	100,15	84,12	957
MD15-16c	ц	40,360	0,004	0,031	0,023	11,806	47,751	0,223	0,018	0,189	0,167	100,57	87,82	1179
MD15-16r	к	40,079	0,004	0,024	0,020	12,924	46,379	0,165	0,018	0,215	0,190	100,02	86,48	1099
MD15-17c	ц	40,612	0,000	0,055	0,029	10,064	49,500	0,340	0,016	0,154	0,156	100,93	89,76	1296
MD15-18c	ц	40,553	0,002	0,040	0,022	10,872	48,238	0,294	0,017	0,171	0,162	100,37	88,78	1237
MD15-18r	к	40,046	0,003	0,020	0,019	14,169	45,844	0,136	0,018	0,231	0,192	100,68	85,22	1024
MD15-19c	ц	40,080	0,003	0,018	0,018	14,014	45,748	0,135	0,020	0,233	0,195	100,46	85,34	1030
MD15-19r	к	39,759	0,002	0,015	0,020	14,105	45,615	0,130	0,018	0,234	0,198	100,10	85,22	1023
MD15-20c	ц	40,662	0,002	0,047	0,024	9,893	49,037	0,346	0,017	0,153	0,152	100,33	89,83	1300
MD15-20r	к	40,265	0,005	0,028	0,022	12,398	46,691	0,186	0,019	0,198	0,172	99,98	87,04	1132
MD13-1c	ц	40,956	0,003	0,062	0,030	9,797	49,547	0,363	0,018	0,156	0,139	101,07	90,02	1311
MD13-2c	ц	40,839	0,001	0,042	0,024	10,094	48,670	0,325	0,018	0,159	0,157	100,33	89,58	1285
MD13-3c	ц	40,895	0,002	0,054	0,027	9,690	48,179	0,365	0,018	0,155	0,143	99,53	89,86	1302
MD13-3r	к	40,434	0,002	0,025	0,023	12,665	46,728	0,221	0,018	0,207	0,162	100,48	86,80	1118
MD13-4c	ц	41,139	0,004	0,051	0,027	9,594	49,084	0,362	0,017	0,151	0,152	100,58	90,12	1318
MD13-4r	к	40,962	0,004	0,044	0,028	9,888	48,338	0,338	0,018	0,155	0,154	99,93	89,71	1293
MD13-5c	ц	40,979	0,004	0,044	0,029	10,314	48,647	0,322	0,019	0,162	0,161	100,68	89,37	1273
MD13-5r	к	40,348	0,003	0,028	0,023	13,013	46,485	0,201	0,021	0,209	0,173	100,50	86,43	1096
MD13-6c	ц	40,633	0,004	0,023	0,023	11,914	47,277	0,222	0,019	0,190	0,171	100,47	87,61	1167
MD13-6r	к	40,315	0,004	0,022	0,020	13,404	46,056	0,177	0,020	0,216	0,182	100,42	85,96	1068
MD13-7c	ц	40,433	0,003	0,024	0,021	13,216	46,155	0,190	0,019	0,214	0,165	100,44	86,16	1080
MD13-8c	ц	40,878	0,001	0,046	0,027	9,916	48,881	0,340	0,018	0,158	0,155	100,42	89,78	1297
MD13-8r	к	40,268	0,005	0,023	0,019	13,624	45,880	0,162	0,021	0,223	0,180	100,41	85,72	1053
MD13-9c	ц	41,036	0,002	0,037	0,027	10,522	48,845	0,324	0,019	0,164	0,155	101,13	89,22	1263
MD13-9r	к	40,505	0,003	0,016	0,020	13,387	46,458	0,150	0,017	0,219	0,196	100,97	86,08	1075
MD13-10c	ц	40,810	0,003	0,045	0,028	10,306	48,452	0,348	0,019	0,162	0,144	100,32	89,34	1271
MD13-10r	к	40,404	0,003	0,027	0,023	11,513	47,430	0,245	0,019	0,184	0,161	100,01	88,02	1191
MD13-11c	ц	40,865	0,004	0,049	0,027	10,647	48,196	0,328	0,018	0,168	0,158	100,46	88,97	1249
MD13-11r	к	40,085	0,004	0,015	0,017	14,362	45,900	0,128	0,020	0,238	0,190	100,96	85,07	1014
MD13-12c	ц	40,730	0,003	0,051	0,028	10,187	48,695	0,332	0,018	0,158	0,166	100,37	89,50	1280
MD13-12r	к	40,181	0,002	0,016	0,020	14,782	44,940	0,117	0,018	0,245	0,194	100,52	84,42	975
MD13-13c	ц	40,561	0,006	0,031	0,026	12,114	47,196	0,227	0,018	0,196	0,173	100,55	87,41	1155
MD13-13r	к	40,220	0,002	0,026	0,025	12,677	46,494	0,191	0,019	0,206	0,175	100,04	86,73	1114
MD13-14c	ц	40,682	0,004	0,034	0,025	10,996	48,033	0,277	0,019	0,171	0,164	100,41	88,62	1227
MD13-14r	к	40,007	0,003	0,018	0,021	14,566	44,905	0,118	0,019	0,241	0,198	100,10	84,60	986
MD13-15c	ц	40,492	0,002	0,030	0,026	11,597	47,463	0,252	0,019	0,184	0,169	100,23	87,95	1187
MD13-15r	к	39,948	0,004	0,018	0,024	13,837	45,511	0,148	0,020	0,223	0,186	99,92	85,43	1036
MD13-16c	ц	40,859	0,002	0,046	0,026	10,348	48,636	0,311	0,018	0,164	0,156	100,57	89,34	1271
MD13-16r	к	40,376	0,002	0,033	0,023	12,361	46,971	0,209	0,018	0,198	0,176	100,37	87,14	1138
MD13-17c	ц	40,220	0,003	0,020	0,022	12,862	45,928	0,162	0,019	0,214	0,189	99,64	86,42	1096
MD13-17r	к	39,944	0,002	0,026	0,022	14,072	45,760	0,145	0,019	0,230	0,190	100,41	85,29	1027
MD13-18c	ц	40,413	0,002	0,029	0,023	12,495	46,949	0,198	0,019	0,204	0,166	100,50	87,01	1131
MD13-18r	к	40,397	0,001	0,022	0,025	12,453	46,908	0,208	0,021	0,196	0,176	100,41	87,04	1132
MD13-19c	ц	40,192	0,002	0,016	0,021	13,432	46,162	0,148	0,021	0,224	0,194	100,41	85,97	1068
MD13-19r	к	40,253	0,004	0,017	0,021	13,265	45,885	0,152	0,019	0,218	0,191	100,02	86,05	1073
MD13-21c	ц	40,371	0,005	0,034	0,025	12,072	47,360	0,248	0,019	0,193	0,168	100,49	87,49	1160
MD13-21r	к	39,749	0,004	0,016	0,021	14,276	45,270	0,132	0,021	0,236	0,194	99,92	84,97	1008
MD18-1c	ц	40,525	0,000	0,049	0,025	10,225	48,597	0,349	0,019	0,159	0,154	100,10	89,44	1277
MD18-1r	к	40,173	0,004	0,021	0,025	12,769	46,166	0,190	0,020	0,208	0,179	99,75	86,57	1104
MD18-2c	ц	40,448	0,002	0,038	0,028	10,869	48,261	0,306	0,019	0,164	0,158	100,29	88,78	1237
MD18-2r	к	40,349	0,003	0,043	0,028	10,505	47,676	0,293	0,019	0,165	0,163	99,24	89,00	1250
MD18-3c	ц	40,451	0,004	0,055	0,027	10,492	48,373	0,345	0,017	0,163	0,151	100,08	89,15	1259
MD18-3r	к	39,959	0,003	0,015	0,020	14,201	45,085	0,127	0,019	0,240	0,196	99,86	84,98	1009
MD18-4c	ц	40,618	0,004	0,041	0,027	10,758	48,281	0,291	0,019	0,171	0,164	100,37	88,89	1244
MD18-5c	ц	40,437	0,006	0,034	0,024	11,504	47,477	0,248	0,019	0,186	0,166	100,10	88,03	1192
MD18-5r	к	40,101	0,002	0,021	0,020	13,272	46,299	0,167	0,019	0,215	0,186	100,30	86,15	1079
MD18-6c	ц	40,753	0,002	0,048	0,024	9,965	48,780	0,345	0,018	0,158	0,153	100,25	89,72	1293
MD18-6r	к	40,266	0,004	0,028	0,023	12,762	46,755	0,198	0,019	0,210	0,178	100,44	86,72	1113

Примечание: ц - центр кристалла, к - край кристалла. Температура рассчитана по (Ford et al., 1983).

Табл. 7. (Продолжение)

Номер анализа	Место анализа	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	NiO	CoO	MnO	CaO	Total	Fo, мол. %	T, °C
MD18-7c	ц	40,460	0,002	0,039	0,024	11,195	48,113	0,283	0,014	0,179	0,159	100,47	88,45	1218
MD18-7r	к	39,792	0,005	0,017	0,020	13,765	45,902	0,148	0,020	0,224	0,190	100,08	85,60	1046
MD18-8c	ц	40,657	0,003	0,044	0,024	10,582	48,393	0,302	0,019	0,168	0,160	100,35	89,07	1255
MD18-8r	к	40,360	0,003	0,025	0,021	12,707	46,913	0,185	0,019	0,207	0,181	100,62	86,81	1119
MD18-9c	ц	40,161	0,002	0,025	0,021	12,304	47,056	0,205	0,019	0,198	0,173	100,16	87,21	1143
MD18-10c	ц	40,241	0,003	0,019	0,020	13,638	46,389	0,157	0,020	0,220	0,182	100,89	85,84	1061
MD18-10r	к	39,869	0,005	0,021	0,020	13,641	45,998	0,155	0,019	0,221	0,191	100,14	85,74	1054
MD18-11c	ц	40,517	0,005	0,033	0,021	11,704	47,567	0,233	0,020	0,189	0,170	100,46	87,87	1183
MD18-11r	к	39,820	0,006	0,017	0,018	13,397	45,513	0,159	0,019	0,218	0,188	99,36	85,83	1060
MD18-12c	ц	40,651	0,003	0,040	0,025	10,841	48,324	0,285	0,017	0,170	0,163	100,52	88,82	1240
MD18-13c	ц	40,410	0,003	0,046	0,026	10,396	48,194	0,313	0,017	0,162	0,162	99,73	89,21	1263
MD18-13r	к	40,401	0,002	0,035	0,024	11,363	47,783	0,265	0,019	0,177	0,168	100,24	88,23	1204
MD18-14c	ц	40,105	0,003	0,053	0,025	11,926	47,306	0,284	0,018	0,190	0,168	100,08	87,61	1167
MD18-16c	ц	40,538	0,007	0,042	0,027	10,788	47,933	0,281	0,020	0,167	0,164	99,97	88,79	1238
MD18-16c	ц	40,138	0,004	0,031	0,018	12,813	46,718	0,194	0,020	0,206	0,170	100,31	86,67	1110
MD18-16r	к	39,912	0,004	0,022	0,018	14,429	45,428	0,143	0,019	0,225	0,186	100,39	84,88	1003
MD18-17c	ц	40,367	0,004	0,038	0,021	11,428	47,900	0,279	0,019	0,178	0,160	100,39	88,20	1202
MD18-18c	ц	40,410	0,005	0,044	0,026	10,828	47,856	0,291	0,019	0,170	0,167	99,82	88,74	1235
MD18-19c	ц	40,509	0,006	0,041	0,021	10,816	48,286	0,305	0,017	0,172	0,158	100,33	88,84	1241
MD18-20c	ц	40,272	0,002	0,032	0,020	12,293	47,363	0,218	0,018	0,197	0,171	100,59	87,29	1148
MD18-21c	ц	40,200	0,003	0,028	0,016	12,251	47,254	0,218	0,018	0,196	0,170	100,35	87,30	1148
MD18-21r	к	40,166	0,005	0,025	0,018	12,554	47,035	0,196	0,018	0,205	0,177	100,40	86,98	1129
MD5-1c	ц	40,754	0,004	0,054	0,027	10,679	48,581	0,338	0,017	0,168	0,140	100,76	89,02	1252
MD5-1r	к	40,556	0,004	0,054	0,029	10,700	48,395	0,339	0,016	0,166	0,138	100,40	88,97	1248
MD5-2c	ц	40,454	0,004	0,053	0,024	11,978	47,728	0,265	0,017	0,191	0,150	100,86	87,66	1170
MD5-2r	к	40,069	0,004	0,023	0,024	12,964	46,679	0,248	0,017	0,204	0,156	100,39	86,52	1102
MD5-3c	ц	40,600	0,007	0,034	0,027	12,280	47,382	0,220	0,018	0,204	0,157	100,93	87,31	1149
MD5-3r	к	40,772	0,003	0,023	0,023	12,737	47,471	0,176	0,017	0,211	0,168	101,60	86,92	1125
MD5-4c	ц	40,420	0,004	0,037	0,027	12,231	47,364	0,216	0,016	0,200	0,157	100,67	87,35	1151
MD5-5c	ц	40,576	0,005	0,038	0,025	10,851	48,318	0,315	0,016	0,174	0,146	100,46	88,81	1239
MD5-5r	к	40,443	0,002	0,030	0,023	11,887	47,809	0,242	0,017	0,190	0,155	100,80	87,76	1176
MD5-6c	ц	40,624	0,004	0,036	0,022	11,421	48,048	0,287	0,017	0,185	0,149	100,79	88,24	1204
MD5-6r	к	40,670	0,005	0,034	0,025	11,397	48,054	0,283	0,017	0,185	0,148	100,82	88,26	1206
MD5-7c	ц	40,602	0,003	0,038	0,026	11,298	48,125	0,286	0,016	0,183	0,151	100,73	88,36	1212
MD5-8c	ц	40,722	0,003	0,039	0,027	11,347	48,928	0,352	0,016	0,158	0,141	100,73	89,40	1274
MD5-8r	к	40,582	0,004	0,041	0,022	11,037	48,180	0,304	0,017	0,174	0,143	100,50	88,61	1227
MD5-10c	ц	40,496	0,004	0,033	0,024	11,833	47,731	0,237	0,017	0,190	0,154	100,72	87,79	1178
MD5-10r	к	40,492	0,003	0,033	0,023	11,815	47,758	0,240	0,015	0,192	0,155	100,73	87,81	1179
MD5-11c	ц	40,768	0,004	0,029	0,024	11,114	48,311	0,297	0,017	0,177	0,147	100,89	88,57	1225
MD5-12c	ц	40,746	0,003	0,043	0,026	10,468	48,749	0,342	0,016	0,163	0,137	100,69	89,25	1265
MD5-12r	к	40,825	0,004	0,039	0,026	11,074	48,476	0,288	0,016	0,179	0,149	101,08	88,64	1229
MD5-13c	ц	40,678	0,003	0,035	0,024	11,505	48,000	0,273	0,015	0,185	0,150	100,87	88,15	1199
MD5-13r	к	40,295	0,002	0,040	0,025	11,384	47,727	0,279	0,016	0,185	0,150	100,10	88,20	1202
MD5-14c	ц	40,860	0,001	0,033	0,024	11,103	48,513	0,297	0,017	0,177	0,148	101,17	88,62	1228
MD5-15r	к	40,814	0,004	0,034	0,024	11,578	48,129	0,278	0,014	0,183	0,153	101,21	88,11	1197
MD5-16r	к	40,817	0,003	0,041	0,027	10,886	48,607	0,314	0,017	0,176	0,148	101,03	88,84	1241
MD5-17c	ц	40,910	0,003	0,044	0,029	10,525	48,836	0,344	0,017	0,164	0,141	101,01	89,22	1263
MD5-18c	ц	40,755	0,007	0,037	0,023	11,151	48,488	0,287	0,017	0,178	0,148	101,09	88,57	1225
MD5-18r	к	40,471	0,002	0,032	0,024	12,032	47,899	0,231	0,017	0,196	0,155	101,06	87,65	1169
MD5-19c	ц	40,546	0,004	0,030	0,022	12,025	47,834	0,237	0,016	0,194	0,159	101,07	87,64	1169
MD5-19r	к	40,060	0,004	0,027	0,020	14,437	45,740	0,145	0,017	0,240	0,173	100,86	84,96	1008
MD5-20c	ц	40,675	0,006	0,030	0,025	11,116	48,400	0,301	0,016	0,179	0,148	100,90	88,59	1226
MD3-1c	ц	40,248	0,005	0,037	0,022	10,818	48,079	0,316	0,017	0,172	0,148	99,86	88,79	1238
MD3-1r	к	40,528	0,003	0,031	0,023	11,811	47,742	0,243	0,018	0,189	0,153	100,74	87,81	1179
MD3-2c	ц	40,648	0,003	0,041	0,029	10,537	48,490	0,333	0,017	0,168	0,140	100,41	89,14	1259
MD3-2r	к	40,265	0,005	0,039	0,022	11,239	47,561	0,290	0,016	0,180	0,146	99,76	88,30	1208
MD3-3c	ц	40,493	0,004	0,039	0,022	10,773	48,334	0,323	0,016	0,173	0,141	100,32	88,89	1244
MD3-3r	к	40,190	0,003	0,034	0,023	11,535	47,540	0,287	0,017	0,183	0,148	99,96	88,02	1192
MD3-4c	ц	40,659	0,003	0,044	0,024	10,798	48,314	0,335	0,017	0,168	0,140	100,50	88,86	1242
MD3-4r	к	40,348	0,002	0,037	0,022	11,394	47,757	0,310	0,016	0,182	0,146	100,21	88,20	1202
MD3-5c	ц	40,137	0,005	0,041	0,023	10,432	48,126	0,343	0,016	0,164	0,140	99,43	89,16	1260
MD3-5r	к	39,917	0,004	0,030	0,021	11,385	47,399	0,270	0,018	0,182	0,149	99,37	88,13	1198
MD3-6c	ц	40,443	0,005	0,060	0,027	10,409	48,453	0,352	0,017	0,161	0,138	100,06	89,25	1265
MD3-6r	к	39,993	0,005	0,038	0,022	11,884	47,033	0,277	0,018	0,187	0,144	99,60	87,59	1165

Примечание: ц - центр кристалла, к - край кристалла. Температура рассчитана по (Ford et al., 1983).

Табл. 7. (Продолжение)

Номер анализа	Место анализа	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	NiO	CoO	MnO	CaO	Total	Fe, мол. %	T, °C
MD3-7c	ц	40,135	0,006	0,051	0,025	11,515	47,669	0,243	0,017	0,186	0,149	99,99	88,07	1194
MD3-7r	к	39,812	0,004	0,027	0,022	12,431	46,709	0,230	0,018	0,199	0,157	99,61	87,01	1131
MD3-8c	ц	40,283	0,001	0,044	0,023	10,469	48,363	0,336	0,015	0,168	0,142	99,84	89,17	1261
MD3-8r	к	40,217	0,002	0,036	0,022	10,580	48,138	0,328	0,016	0,167	0,139	99,65	89,03	1252
MD3-9c	ц	40,391	0,002	0,030	0,022	10,912	48,099	0,297	0,016	0,177	0,149	100,10	88,71	1233
MD3-9r	к	40,231	0,003	0,039	0,022	11,332	47,650	0,273	0,015	0,185	0,151	99,90	88,23	1204
MD3-10c	ц	40,571	0,004	0,053	0,022	10,462	48,667	0,345	0,015	0,163	0,139	100,44	89,24	1265
MD3-10r	к	40,751	0,006	0,031	0,023	11,517	48,064	0,256	0,015	0,189	0,154	101,01	88,15	1199
MD3-11c	ц	40,648	0,002	0,048	0,024	10,388	48,483	0,348	0,015	0,163	0,139	100,26	89,27	1267
MD3-11r	к	40,718	0,004	0,034	0,023	11,700	47,741	0,258	0,015	0,188	0,148	100,83	87,91	1185
MD3-12c	ц	40,287	0,004	0,028	0,023	11,222	47,831	0,275	0,017	0,179	0,149	100,01	88,37	1213
MD3-12r	к	40,472	0,002	0,033	0,023	11,286	47,830	0,271	0,017	0,181	0,148	100,26	88,31	1209
MD3-13c	ц	40,601	0,004	0,042	0,023	10,611	48,543	0,328	0,017	0,170	0,141	100,48	89,08	1255
MD3-13r	к	40,373	0,003	0,022	0,019	13,279	46,871	0,177	0,017	0,220	0,162	101,14	86,29	1087
MD3-14c	ц	40,373	0,006	0,036	0,023	11,057	48,314	0,302	0,017	0,175	0,147	100,45	88,62	1228
MD3-14r	к	40,203	0,005	0,024	0,021	13,016	47,048	0,185	0,017	0,211	0,168	100,90	86,57	1104
MD3-15c	ц	40,738	0,004	0,042	0,027	10,557	48,774	0,342	0,016	0,164	0,138	100,80	89,17	1261
MD3-15r	к	40,674	0,004	0,053	0,027	10,375	48,833	0,350	0,016	0,164	0,138	100,63	89,35	1272
MD3-16c	ц	40,631	0,005	0,037	0,025	10,628	48,444	0,331	0,017	0,169	0,141	100,43	89,04	1253
MD3-16r	к	40,566	0,004	0,024	0,020	12,208	47,536	0,200	0,018	0,195	0,160	100,93	87,41	1155
MD3-17c	ц	40,368	0,002	0,027	0,021	11,843	47,833	0,254	0,017	0,185	0,150	100,70	87,81	1179
MD3-17r	к	40,191	0,006	0,024	0,022	12,865	46,783	0,188	0,017	0,212	0,161	100,47	86,64	1108
MD3-18c	ц	40,472	0,003	0,033	0,027	10,747	48,474	0,316	0,016	0,167	0,140	100,40	88,94	1247
MD3-18r	к	40,376	0,005	0,057	0,022	11,134	48,197	0,283	0,017	0,176	0,150	100,42	88,53	1222
MD3-19c	ц	40,641	0,003	0,042	0,026	10,732	48,410	0,313	0,018	0,169	0,145	100,50	88,94	1247
MD3-19r	к	40,609	0,004	0,045	0,025	10,768	48,443	0,318	0,015	0,170	0,143	100,54	88,91	1245
MD3-20c	ц	40,538	0,004	0,023	0,022	11,975	47,715	0,242	0,017	0,191	0,156	100,88	87,66	1170
MD3-20r	к	40,392	0,003	0,033	0,022	12,461	47,231	0,244	0,017	0,202	0,156	100,76	87,11	1137
MD1-1c	ц	40,695	0,004	0,027	0,023	11,625	47,920	0,254	0,018	0,187	0,151	100,90	88,02	1192
MD1-1r	к	40,337	0,005	0,028	0,021	12,524	47,078	0,211	0,017	0,199	0,156	100,58	87,02	1131
MD1-2c	ц	40,559	0,003	0,030	0,022	11,518	48,102	0,258	0,017	0,187	0,153	100,85	88,16	1200
MD1-2r	к	40,075	0,004	0,019	0,022	13,811	46,438	0,144	0,019	0,228	0,169	100,93	85,70	1052
MD1-3c	ц	40,557	0,005	0,032	0,020	11,676	48,078	0,250	0,017	0,190	0,151	100,98	88,01	1191
MD1-3r	к	40,154	0,002	0,018	0,023	12,967	46,989	0,182	0,017	0,214	0,169	100,73	86,60	1106
MD1-4c	ц	40,598	0,002	0,038	0,024	10,740	48,768	0,322	0,016	0,170	0,146	100,82	89,01	1251
MD1-4r	к	40,553	0,004	0,025	0,023	11,883	47,859	0,251	0,017	0,192	0,154	100,96	87,78	1177
MD1-5c	ц	40,615	0,004	0,037	0,024	10,921	48,565	0,297	0,018	0,173	0,147	100,80	88,80	1238
MD1-6c	ц	40,726	0,002	0,033	0,025	10,747	48,576	0,312	0,015	0,169	0,143	100,75	88,96	1248
MD1-7c	ц	40,463	0,006	0,039	0,027	10,575	48,930	0,339	0,017	0,165	0,141	100,70	89,19	1262
MD1-7r	к	40,807	0,004	0,042	0,023	10,503	48,955	0,339	0,017	0,166	0,136	100,99	89,26	1266
MD1-8c	ц	40,787	0,003	0,049	0,027	10,452	48,985	0,347	0,016	0,162	0,142	100,97	89,31	1269
MD1-8r	к	40,138	0,004	0,030	0,022	12,560	47,346	0,197	0,017	0,199	0,159	100,67	87,05	1133
MD1-9c	ц	40,466	0,004	0,030	0,027	10,792	48,627	0,313	0,018	0,176	0,149	100,60	88,93	1246
MD1-10c	ц	40,645	0,004	0,037	0,023	10,334	49,298	0,352	0,016	0,163	0,141	101,01	89,48	1279
MD1-11c	ц	40,526	0,003	0,037	0,024	10,559	48,953	0,334	0,016	0,168	0,139	100,76	89,21	1263
MD1-12c	ц	40,710	0,003	0,040	0,027	10,533	48,839	0,337	0,016	0,170	0,141	100,82	89,21	1263
MD1-12r	к	40,747	0,005	0,019	0,022	13,167	47,500	0,167	0,018	0,216	0,171	102,03	86,54	1103
MD1-13c	ц	40,689	0,003	0,036	0,024	10,652	48,677	0,332	0,017	0,167	0,144	100,74	89,07	1254
MD1-14c	к	40,651	0,003	0,025	0,022	11,418	48,225	0,272	0,017	0,180	0,154	100,97	88,28	1207
MD1-15c	ц	40,860	0,007	0,045	0,026	10,986	48,415	0,302	0,018	0,173	0,145	100,98	88,71	1233
MD1-15r	к	40,681	0,004	0,027	0,022	11,576	48,000	0,259	0,017	0,187	0,154	100,93	88,09	1195
MD1-16c	ц	40,441	0,004	0,034	0,025	10,510	48,652	0,349	0,017	0,163	0,142	100,34	89,19	1262
MD1-16r	к	40,351	0,005	0,024	0,021	13,598	46,573	0,146	0,018	0,225	0,182	101,14	85,93	1066
MD1-17c	ц	40,294	0,004	0,031	0,022	11,599	47,976	0,265	0,017	0,184	0,147	100,54	88,06	1194
MD1-18c	ц	40,377	0,002	0,030	0,023	10,998	48,411	0,307	0,017	0,173	0,145	100,48	88,70	1232
MD1-18r	к	40,662	0,004	0,039	0,031	11,217	48,389	0,290	0,016	0,179	0,152	100,98	88,49	1220
MD1-19c	ц	40,648	0,003	0,029	0,025	11,329	48,109	0,279	0,015	0,178	0,147	100,76	88,33	1210
MD2-1c	ц	40,833	0,004	0,043	0,028	10,411	48,850	0,350	0,015	0,162	0,141	100,84	89,32	1270
MD2-1r	к	40,937	0,004	0,037	0,024	10,824	48,534	0,316	0,018	0,171	0,144	101,01	88,88	1243
MD2-2c	ц	40,605	0,004	0,036	0,025	11,040	48,311	0,295	0,018	0,173	0,148	100,65	88,64	1229
MD2-3c	ц	40,522	0,005	0,037	0,027	10,925	48,333	0,299	0,016	0,174	0,147	100,48	88,75	1235
MD2-6c	ц	40,803	0,003	0,037	0,026	10,889	48,371	0,314	0,015	0,173	0,149	100,78	88,79	1238
MD2-6r	к	40,188	0,003	0,022	0,023	12,279	47,139	0,225	0,017	0,197	0,157	100,25	87,25	1145
MD2-6c	ц	40,590	0,005	0,027	0,022	11,956	47,807	0,240	0,015	0,194	0,158	101,01	87,70	1172

Примечание: ц - центр кристалла, к - край кристалла. Температура рассчитана по (Ford et al., 1983).

Табл. 7. (Продолжение)

Номер анализа	Место анализа	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	NiO	CoO	MnO	CaO	Total	Fo, мол. %	T, °C
MD2-7c	ц	40,326	0,003	0,041	0,025	10,931	48,433	0,315	0,016	0,173	0,146	100,41	88,76	1236
MD2-7r	к	40,001	0,005	0,023	0,025	13,330	46,345	0,163	0,017	0,218	0,171	100,30	86,11	1077
MD2-8c	ц	40,095	0,003	0,034	0,025	11,108	48,307	0,289	0,017	0,178	0,152	100,21	88,58	1225
MD2-8r	к	40,338	0,003	0,027	0,022	11,699	47,782	0,263	0,017	0,187	0,152	100,49	87,93	1186
MD2-9c	ц	40,489	0,005	0,043	0,024	10,553	48,669	0,333	0,016	0,165	0,139	100,44	89,16	1260
MD2-9r	к	39,987	0,004	0,064	0,026	12,157	47,088	0,229	0,017	0,194	0,155	99,92	87,35	1151
MD2-10c	ц	40,768	0,003	0,038	0,024	10,973	48,561	0,298	0,016	0,175	0,146	101,00	88,75	1235
MD2-10r	к	39,910	0,004	0,019	0,022	13,006	46,252	0,175	0,017	0,212	0,172	99,79	86,38	1093
MD2-11c	ц	40,603	0,005	0,031	0,025	11,161	48,396	0,324	0,016	0,173	0,140	100,87	88,55	1223
MD2-11r	к	39,498	0,004	0,018	0,022	12,926	46,450	0,176	0,016	0,210	0,171	99,49	86,50	1100
MD2-12c	ц	40,746	0,003	0,041	0,023	10,803	48,554	0,332	0,017	0,170	0,142	100,83	88,91	1245
MD2-12r	к	39,900	0,001	0,019	0,022	12,999	46,856	0,188	0,018	0,210	0,175	100,39	86,54	1102
MD2-14c	ц	40,482	0,003	0,038	0,026	10,568	48,769	0,341	0,018	0,162	0,144	100,55	89,16	1260
MD2-15c	ц	40,323	0,004	0,039	0,027	11,997	47,895	0,337	0,015	0,175	0,142	100,95	87,68	1171
MD14-1	ц	40,750	0,004	0,046	0,032	9,993	48,968	0,335	0,017	0,157	0,153	100,45	89,73	1294
MD14-2	ц	40,191	0,005	0,027	0,024	12,229	47,406	0,235	0,017	0,196	0,168	100,50	87,36	1152
MD14-3	ц	40,492	0,005	0,027	0,027	12,130	47,556	0,221	0,018	0,189	0,173	100,84	87,48	1159
MD14-4c	ц	40,352	0,005	0,035	0,027	10,582	48,533	0,293	0,016	0,168	0,164	100,17	89,10	1257
MD14-4r	к	40,684	0,005	0,037	0,028	10,518	48,725	0,293	0,017	0,167	0,163	100,64	89,20	1262
MD14-5	ц	40,674	0,004	0,029	0,026	11,692	47,847	0,237	0,017	0,188	0,168	100,88	87,95	1187
MD14-6	ц	40,244	0,003	0,041	0,026	10,957	47,999	0,281	0,019	0,172	0,154	99,90	88,65	1229
MD14-7c	ц	40,290	0,002	0,029	0,025	11,907	47,534	0,229	0,019	0,188	0,168	100,39	87,68	1171
MD14-7r	к	40,080	0,001	0,026	0,028	12,102	47,206	0,221	0,018	0,190	0,173	100,04	87,43	1156
MD14-8	ц	40,627	0,001	0,040	0,028	10,306	48,829	0,306	0,016	0,164	0,155	100,47	89,41	1275
MD14-9	ц	40,682	0,005	0,044	0,029	10,969	48,560	0,324	0,017	0,173	0,156	100,96	88,76	1236
MD14-10	ц	40,226	0,003	0,024	0,026	12,755	47,109	0,218	0,018	0,199	0,165	100,74	86,82	1119
MD14-11	ц	40,352	0,002	0,036	0,026	10,930	48,215	0,284	0,017	0,172	0,161	100,19	88,72	1233
MD14-12	ц	40,549	0,005	0,033	0,026	11,755	47,691	0,272	0,018	0,187	0,157	100,69	87,85	1182
MD14-13	ц	40,590	0,001	0,030	0,026	11,837	47,660	0,232	0,020	0,189	0,169	100,75	87,77	1177
MD14-14c	ц	40,225	0,004	0,024	0,026	12,275	47,588	0,213	0,018	0,195	0,174	100,74	87,36	1152
MD14-14r	к	39,878	0,004	0,018	0,022	13,411	46,280	0,160	0,018	0,217	0,189	100,20	86,02	1071
MD14-15	ц	40,788	0,004	0,045	0,029	10,358	48,861	0,300	0,017	0,162	0,164	100,73	89,37	1273
MD14-16	ц	40,775	0,002	0,045	0,028	10,485	48,738	0,310	0,018	0,166	0,161	100,73	89,23	1264
MD14-17	ц	40,829	0,002	0,036	0,029	10,543	48,738	0,302	0,016	0,162	0,153	100,81	89,18	1261
MD14-18	ц	40,583	0,003	0,058	0,029	10,577	48,661	0,309	0,017	0,166	0,164	100,57	89,13	1258
MD14-19	ц	40,636	0,004	0,032	0,026	11,896	47,679	0,240	0,019	0,189	0,165	100,89	87,72	1174
MD14-20	ц	40,608	0,006	0,062	0,028	10,340	48,853	0,310	0,018	0,162	0,160	100,55	89,39	1274
MD14-21	ц	39,822	0,004	0,026	0,026	13,569	46,353	0,160	0,019	0,217	0,170	100,37	85,90	1064
MD14-22	ц	40,548	0,004	0,026	0,026	12,017	47,656	0,214	0,018	0,192	0,174	100,87	87,61	1167
MD14-23	ц	40,508	0,004	0,037	0,027	11,352	48,113	0,262	0,017	0,178	0,164	100,66	88,31	1209
MD14-24	ц	40,445	0,003	0,037	0,028	10,551	48,680	0,317	0,016	0,165	0,158	100,40	89,16	1260
MD14-25	ц	40,062	0,004	0,031	0,025	11,466	47,794	0,256	0,017	0,184	0,167	100,01	88,14	1199
MD14-26	ц	40,557	0,005	0,034	0,026	11,310	48,214	0,258	0,017	0,178	0,163	100,76	88,37	1213
MD14-27	ц	40,375	0,003	0,058	0,028	12,102	47,620	0,222	0,017	0,193	0,172	100,79	87,52	1162
MD14-28	ц	40,818	0,003	0,036	0,026	10,697	48,681	0,295	0,017	0,170	0,161	100,90	89,03	1252
MD14-29c	ц	40,497	0,006	0,037	0,028	10,616	48,653	0,292	0,018	0,167	0,165	100,48	89,10	1256
MD14-29r	к	40,197	0,003	0,037	0,025	11,483	47,789	0,290	0,016	0,181	0,160	100,18	88,12	1198
MD14-30	ц	39,987	0,003	0,017	0,021	13,964	46,113	0,140	0,019	0,230	0,195	100,69	85,48	1039
MD14-31	ц	40,345	0,003	0,017	0,022	13,690	46,346	0,146	0,020	0,224	0,194	101,01	85,79	1057
MD14-32	ц	40,367	0,003	0,027	0,024	12,176	47,330	0,208	0,018	0,193	0,173	100,52	87,39	1154
MD14-33	ц	40,552	0,002	0,036	0,025	11,044	48,240	0,289	0,017	0,173	0,161	100,54	88,62	1228
MD14-34	к	39,879	0,004	0,017	0,022	14,082	46,148	0,136	0,019	0,232	0,193	100,73	85,39	1033
MD14-35	ц	40,576	0,003	0,029	0,026	11,597	48,039	0,247	0,017	0,184	0,163	100,88	88,07	1195
MD14-36	ц	40,605	0,005	0,037	0,029	11,005	48,367	0,285	0,018	0,172	0,161	100,68	88,68	1231
MD14-37	ц	40,584	0,001	0,027	0,024	11,773	47,929	0,233	0,017	0,185	0,172	100,94	87,89	1184
MD14-38	ц	40,435	0,003	0,027	0,026	12,254	47,431	0,212	0,017	0,193	0,171	100,77	87,34	1151
MD14-39	ц	40,096	0,003	0,045	0,028	10,817	48,416	0,303	0,018	0,169	0,158	100,05	88,86	1242
MD14-40	ц	40,472	0,004	0,036	0,025	10,726	48,494	0,289	0,015	0,172	0,164	100,40	88,96	1248
MD14-41	ц	40,829	0,003	0,044	0,028	9,938	49,227	0,361	0,016	0,151	0,156	100,75	89,83	1300
MD14-43	ц	40,230	0,003	0,027	0,028	11,898	47,682	0,229	0,018	0,187	0,173	100,47	87,72	1174
MD14-44c	ц	40,416	0,004	0,025	0,026	12,013	47,678	0,223	0,017	0,186	0,173	100,76	87,62	1167
MD14-44r	к	40,240	0,004	0,024	0,024	13,633	46,318	0,141	0,018	0,223	0,190	100,81	85,83	1060

Примечание: ц - центр кристалла, к - край кристалла. Температура рассчитана по (Ford et al., 1983).

Табл. 8. Состав дочерних фаз в расплавных включениях в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат (мас. %).

Образец	№ включения	Фаза	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Ca	Na	Mg	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Al ^{VI}	Mn	Ti	Si	Al ^{IV}	O	
MD-6	1	СРх	42,51	1,64	15,81	7,62	9,82	21,33	0,61	0,16	99,51	0,82	0,06	0,54	0,23		0,71		0,04	1,60		6,00	
		Стекло	55,60	0,23	23,43	2,61	1,39	5,16	4,99	1,08	94,49												
	2	СРх ц	38,79	1,87	15,68	9,06	8,69	22,30	0,24	н.п.о.	96,63	0,90	0,02	0,49	0,29		0,70		0,05	1,46		6,00	
		СРх к	46,98	0,88	10,09	6,11	13,68	20,78	0,50	н.п.о.	99,02	0,80	0,03	0,73	0,18		0,43		0,02	1,68		6,00	
	3	СРх	56,69	0,35	20,12	2,33	1,13	5,32	4,03	0,66	90,63												
		СРх	42,23	0,73	17,76	7,65	8,71	22,46	0,50	н.п.о.	100,04	0,88	0,04	0,47	0,23		0,76		0,02	1,54		6,00	
	4	СРх ц	53,66	0,48	18,91	2,56	1,67	5,15	4,02	0,67	87,12												
		СРх к	40,07	2,02	16,17	9,11	9,00	21,52	0,34	н.п.о.	98,23	0,90	0,03	0,52	0,30		0,74		0,06	1,56		6,00	
	5	СРх к	46,02	1,42	11,94	7,23	12,98	20,43	0,53	н.п.о.	100,55	0,81	0,04	0,72	0,22		0,52		0,04	1,71		6,00	
		СРх ц	59,09	0,43	20,73	2,52	1,08	4,21	4,48	0,83	93,37												
	6	СРх к	45,29	1,10	9,52	7,78	13,13	21,00	0,43	н.п.о.	98,25	0,86	0,03	0,75	0,25		0,43		0,03	1,73		6,00	
		СРх к	48,01	0,67	7,12	4,79	14,49	22,63	0,23	н.п.о.	97,94	0,93	0,02	0,83	0,15		0,32		0,02	1,84		6,00	
	7	СР	н.п.о.	0,25	56,40	21,25	18,62	1,13	0,46	н.п.о.	98,11	0,03		0,73	0,24	0,23	1,76					4,00	
		СРх к	58,83	0,47	20,67	1,84	0,51	4,32	3,80	0,96	91,40												
	8	СРх ц	40,46	1,60	14,23	10,00	9,47	22,14	0,30	н.п.о.	98,20	0,92	0,02	0,55	0,32		0,65		0,05	1,57		6,00	
		СРх к	46,23	0,98	8,58	7,20	13,71	20,79	0,28	н.п.о.	97,77	0,86	0,02	0,79	0,23		0,39		0,03	1,78		6,00	
	9	СРх к	58,64	0,52	20,58	1,97	0,60	5,41	3,48	0,86	92,06												
		СРх ц	43,41	1,15	12,45	7,85	11,41	21,37	0,31	н.п.о.	97,95	0,85	0,02	0,63	0,24		0,54		0,03	1,61		6,00	
	10	СРх к	47,58	0,72	8,99	6,36	14,11	19,49	0,81	н.п.о.	98,06	0,76	0,06	0,76	0,19		0,39		0,02	1,73		6,00	
		СРх к	56,09	0,58	18,59	1,90	0,93	4,93	4,04	0,88	87,94												
11	СРх ц	39,43	1,30	15,85	9,85	8,39	22,47	0,24	н.п.о.	97,53	0,93	0,02	0,48	0,32		0,72		0,04	1,52		6,00		
	СРх к	46,62	0,83	7,22	7,47	14,79	19,77	0,34	н.п.о.	97,04	0,81	0,02	0,84	0,24		0,32		0,02	1,77		6,00		
12	СР	н.п.о.	н.п.о.	55,68	20,51	17,84	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	94,03			0,73	0,27	0,2	1,80					4,00		
	СРх к	58,36	0,47	20,10	2,32	0,90	4,42	3,84	0,72	91,13													
13	СРх ц	41,23	1,60	13,77	9,80	9,54	21,90	0,22	н.п.о.	98,06	0,89	0,02	0,54	0,31		0,62		0,05	1,56		6,00		
	СРх к	46,70	0,98	8,71	6,92	13,95	20,69	0,38	н.п.о.	98,33	0,84	0,03	0,78	0,22		0,39		0,03	1,76		6,00		
14	СР	н.п.о.	0,18	61,54	20,01	19,65	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	101,38			0,74	0,27	0,2	1,83					4,00		
	СРх к	59,50	0,40	20,33	2,43	0,99	4,66	4,07	0,69	93,07													
15	СРх ц	41,87	1,50	13,06	9,31	10,66	22,11	0,24	н.п.о.	98,75	0,89	0,02	0,60	0,29		0,58		0,04	1,57		6,00		
	СРх к	45,61	1,00	10,22	7,67	13,12	21,42	0,36	н.п.о.	99,40	0,87	0,03	0,74	0,24		0,45		0,03	1,72		6,00		
16	СР	н.п.о.	н.п.о.	60,92	16,27	20,86	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	98,05			0,80	0,20	0,2	1,85					4,00		
	СРх к	54,51	0,60	19,86	1,69	1,69	4,20	4,73	1,19	88,47													
17	СРх ц	39,83	1,30	13,98	8,71	8,72	21,88	0,28	н.п.о.	94,70	0,98	0,02	0,54	0,30		0,69		0,04	1,66		6,00		
	СРх к	43,51	1,28	9,69	6,81	12,01	21,06	0,27	н.п.о.	94,63	0,93	0,02	0,74	0,23		0,47		0,04	1,80		6,00		
18	СР	н.п.о.	0,15	54,23	20,08	18,01	0,11	н.п.о.	н.п.о.	92,58			0,8	0,2	0,2	1,8					4,00		
	СРх к	52,46	0,75	20,26	4,16	2,57	6,24	4,95	0,82	92,21													
19	Рёнит	28,51	2,42	20,37	24,31	13,59	11,95	0,52	н.п.о.	101,68	3,30	0,26	5,21	2,78	2,46	1,52			0,47	7,34	4,66	40,00	
	СРх к	50,66	0,73	20,28	6,60	2,80	14,47	2,77	0,34	98,64													
20	Рёнит	24,74	3,08	19,57	25,89	12,78	12,50	0,44	н.п.о.	99,00	3,56	0,23	5,07	2,08	3,68	0,73	0,03	0,62	6,59	5,41	40,00		
	СРх к	48,84	0,73	19,76	5,79	2,22	13,53	2,99	0,39	94,25													
21	Рёнит	24,18	2,52	20,00	27,69	12,65	12,50	0,31	н.п.о.	99,85	3,55	0,16	5,00	2,05	4,09	0,65			0,50	6,41	5,59	40,00	
	СРх к	47,14	0,84	19,03	7,00	4,59	13,63	2,59	0,28	95,10													
22	СРх	38,70	1,25	16,23	10,12	7,73	22,35	0,30	н.п.о.	96,68	0,94	0,02	0,45	0,33		0,75		0,04	1,52		6,00		
	СР	н.п.о.	0,12	57,61	18,72	20,07	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	96,52			0,8	0,3	0,2	1,8					4,00		
23	СРх к	46,21	0,97	19,69	6,18	3,47	15,34	2,53	0,33	94,72													

Примечание: н.п.о. - ниже пределов обнаружения; формульные единицы рассчитаны по стехиометрии на 4 атома кислорода для шиннели, 6 - пироксена, 40 - рёнита.

Табл. 9. Состав стекол (мас. %) расплавных включений в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат.

Образец	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-5	MD-8	MD-8	MD-8	MD-8	MD-8	MD-8	MD-8	
Измеренные составы	SiO ₂	45,35	46,09	44,54	44,57	44,50	44,39	45,10	44,61	47,95	47,17	46,39	46,53	47,11	44,05	45,68	49,08	52,66	49,45	48,78	48,68	
	TiO ₂	0,63	0,63	0,68	0,70	0,70	0,70	0,73	0,70	0,86	0,88	0,94	0,89	0,89	0,58	1,04	0,77	0,60	0,81	0,77	0,57	
	Al ₂ O ₃	15,50	14,68	16,32	15,87	16,54	16,19	15,22	15,60	17,15	17,36	16,58	16,55	17,37	15,03	20,05	17,14	18,01	21,21	19,78	18,75	
	FeO	10,88	12,48	10,29	9,99	9,24	10,01	10,63	11,31	8,70	8,15	10,49	8,76	8,42	7,94	4,37	7,54	6,54	4,98	6,34	6,51	
	MnO	0,16	0,20	0,15	0,14	0,13	0,14	0,15	0,16	0,12	0,12	0,13	0,11	0,13	-	-	0,14	0,12	0,11	0,13	0,12	
	MgO	14,32	13,24	14,33	14,28	14,21	14,14	14,02	13,24	5,06	7,19	5,32	7,29	5,97	16,86	4,69	6,03	5,16	4,37	5,39	4,79	
	CaO	10,83	10,54	11,53	11,57	12,03	12,01	11,64	11,88	14,68	14,58	13,60	14,36	14,90	9,23	15,43	12,91	11,12	11,92	11,86	13,50	
	Na ₂ O	1,86	1,74	1,95	1,99	2,04	2,00	2,04	1,90	2,38	2,45	2,40	2,24	2,31	2,27	2,86	2,71	3,61	4,03	3,52	2,64	
	K ₂ O	0,280	0,29	0,27	0,29	0,29	0,29	0,31	0,29	0,42	0,40	0,38	0,39	0,38	0,25	0,44	0,44	0,58	0,71	0,63	0,44	
	P ₂ O ₅	0,085	0,057	0,081	0,082	0,074	0,116	0,079	0,066	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	-	-	0,11	0,11	0,13	0,12	0,12	
	S	0,149	0,120	0,101	0,420	0,186	0,216	0,184	0,224	0,20	0,31	0,31	0,32	0,30	-	-	0,26	0,38	0,31	0,22	0,35	
	Cl	0,096	0,092	0,102	0,112	0,108	0,114	0,112	0,115	0,20	0,19	0,19	0,20	0,19	-	-	0,23	0,29	0,36	0,32	0,23	
	Cr ₂ O ₃	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,06	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Сумма	100,52	100,47	100,67	100,68	100,44	100,78	100,64	100,56	97,83	98,90	96,83	97,72	98,07	96,22	94,55	97,35	99,18	98,37	97,85	96,70	
	Fo оливина	86,91	86,87	87,67	88,54	88,68	88,38	87,61	87,29	88,27	88,62	88,07	88,58	88,79	88,03	88,25	87,63	87,63	88,58	87,59	87,90	
	Захваченные составы расплавных включений после реконструкции	SiO ₂	46,02	47,18	44,74	44,94	44,50	44,51	45,54	45,23	47,49	46,51	47,24	46,67	46,69	45,97	45,71	48,61	50,34	47,43	47,75	48,05
		TiO ₂	0,71	0,71	0,75	0,76	0,74	0,75	0,81	0,78	0,74	0,77	0,85	0,80	0,76	0,69	0,86	0,67	0,49	0,63	0,65	0,47
		Al ₂ O ₃	17,54	16,63	17,97	17,14	17,43	17,42	16,83	17,30	14,66	15,17	15,07	14,90	14,88	17,86	16,48	14,91	14,74	16,57	16,63	15,60
Fe ₂ O ₃		1,44	1,45	1,46	1,52	1,52	1,51	1,54	1,49	1,62	1,63	1,61	1,63	1,63	1,50	1,58	1,61	1,68	1,65	1,60	1,55	
FeO		9,14	9,14	9,13	9,08	9,08	9,08	9,06	9,10	8,99	8,99	9,01	8,99	8,99	9,09	9,03	9,03	8,94	8,97	9,02	9,06	
MnO		0,18	0,23	0,17	0,15	0,14	0,15	0,17	0,18	0,10	0,11	0,12	0,10	0,11	но	но	0,12	0,10	0,09	0,11	0,10	
MgO		10,13	10,32	10,51	11,31	11,36	11,04	10,43	10,18	11,37	11,50	11,12	11,52	11,78	10,92	10,95	11,00	11,10	11,53	10,68	11,28	
CaO		12,26	11,94	12,70	12,50	12,68	12,92	12,87	13,17	12,55	12,74	12,36	12,93	12,77	10,97	12,68	11,23	9,10	9,31	9,97	11,23	
Na ₂ O		2,11	1,97	2,15	2,15	2,15	2,15	2,26	2,11	2,03	2,14	2,18	2,02	1,98	2,70	2,35	2,36	2,95	3,15	2,96	2,20	
K ₂ O		0,32	0,33	0,30	0,31	0,31	0,31	0,34	0,32	0,36	0,35	0,35	0,35	0,33	0,30	0,36	0,38	0,48	0,56	0,53	0,37	
P ₂ O ₅		0,10	0,07	0,09	0,09	0,08	0,13	0,09	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	-	-	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	
S		0,17	0,14	0,11	0,45	0,20	0,23	0,20	0,25	0,17	0,27	0,27	0,28	0,25	-	-	0,22	0,31	0,24	0,18	0,28	
Cl		0,11	0,10	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,13	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	-	-	0,19	0,24	0,27	0,26	0,18	
Cr ₂ O ₃		0,06	0,05	0,04	0,05	0,03	0,03	0,07	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
T°C, Ford		1244	1248	1255	1276	1278	1269	1255	1245	1276	1281	1272	1280	1285	1277	1272	1274	1292	1305	1280	1277	
#Al		0,85	0,80	0,86	0,79	0,80	0,81	0,81	0,84	0,67	0,69	0,70	0,68	0,67	0,84	0,77	0,69	0,68	0,75	0,79	0,72	
Расчитанные первичные расплавы в равновесии с Fo _{86,4}		SiO ₂	45,52	46,56	44,44	44,72	44,32	44,30	45,18	44,85	47,10	46,24	46,83	46,38	46,43	45,63	45,42	48,01	49,61	47,11	47,21	47,54
		TiO ₂	0,65	0,65	0,70	0,72	0,71	0,72	0,75	0,72	0,70	0,74	0,80	0,76	0,73	0,65	0,81	0,62	0,46	0,60	0,60	0,44
	Al ₂ O ₃	16,01	15,13	16,74	16,35	16,69	16,54	15,66	15,97	13,86	14,50	14,17	14,23	14,29	16,78	15,60	13,83	13,66	15,81	15,43	14,58	
	Fe ₂ O ₃	1,91	1,95	1,88	1,91	1,90	1,91	1,97	1,94	2,06	2,04	2,05	2,05	2,03	1,93	1,99	2,10	2,20	2,08	2,08	2,02	
	FeO	8,77	8,75	8,77	8,72	8,73	8,72	8,69	8,74	8,60	8,61	8,62	8,62	8,62	8,72	8,66	8,61	8,50	8,58	8,61	8,64	
	MnO	0,17	0,21	0,15	0,14	0,13	0,14	0,15	0,16	0,10	0,10	0,11	0,09	0,11	-	-	0,11	0,09	0,08	0,10	0,09	
	MgO	13,44	13,71	13,08	13,03	12,92	12,91	13,05	13,09	13,38	13,12	13,33	13,19	13,23	13,18	12,94	13,67	13,80	13,22	13,38	13,69	
	CaO	11,18	10,86	11,83	11,92	12,14	12,27	11,98	12,16	11,86	12,18	11,63	12,34	12,26	10,31	12,01	10,42	8,43	8,89	9,25	10,50	
	Na ₂ O	1,92	1,79	2,00	2,05	2,06	2,04	2,10	1,95	1,92	2,05	2,05	1,93	1,90	2,53	2,23	2,19	2,74	3,00	2,75	2,05	
	K ₂ O	0,29	0,30	0,28	0,30	0,29	0,30	0,32	0,30	0,34	0,33	0,32	0,34	0,31	0,28	0,34	0,36	0,44	0,53	0,49	0,34	
	P ₂ O ₅	0,09	0,06	0,08	0,08	0,07	0,12	0,08	0,07	0,09	0,08	0,09	0,09	0,08	-	-	0,09	0,08	0,10	0,09	0,09	
	S	0,155	0,125	0,104	0,432	0,187	0,221	0,190	0,230	0,161	0,254	0,254	0,265	0,243	-	-	0,208	0,284	0,228	0,169	0,259	
	Cl	0,073	0,066	0,081	0,084	0,082	0,087	0,083	0,087	0,098	0,103	0,101	0,104	0,096	-	-	0,110	0,133	0,182	0,170	0,111	
	Cr ₂ O ₃	0,052	0,041	0,041	0,052	0,031	0,030	0,061	0,072	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Табл. 9. (Продолжение)

Образец	MD-8	MD-8	MD-13	MD-13	MD-13	MD-13	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18
Измеренные составы	SiO ₂	46,06	46,59	47,60	48,03	47,51	46,91	48,92	50,65	48,91	49,11	49,00	49,16	49,93	48,42	46,66	48,58	47,76	49,06
	TiO ₂	0,93	0,98	0,92	0,91	0,92	1,04	1,05	1,04	1,02	1,04	1,05	0,95	0,94	0,96	0,97	1,12	1,00	0,98
	Al ₂ O ₃	18,23	18,97	17,93	18,92	19,27	18,11	20,70	19,99	20,09	20,17	19,89	20,19	19,73	19,47	21,12	19,83	20,07	19,53
	FeO	7,02	6,46	6,79	8,74	6,79	7,04	5,01	5,18	5,32	5,23	5,37	6,08	6,28	5,96	8,13	5,17	5,25	5,42
	MnO	0,12	0,11	0,10	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,11	0,12	0,10	0,18	0,08	0,09	0,09
	MgO	5,92	5,38	5,81	4,66	6,61	5,89	2,54	2,56	3,30	3,21	2,96	3,19	2,85	3,46	2,78	3,11	2,92	3,34
	CaO	15,20	16,36	14,67	14,25	15,02	14,90	17,71	17,01	17,72	17,44	17,88	16,23	16,38	17,08	16,09	17,64	16,94	17,38
	Na ₂ O	2,47	2,52	2,50	2,61	2,28	2,51	2,28	2,51	2,78	3,01	2,78	2,65	2,82	2,46	2,72	2,39	2,33	3,07
	K ₂ O	0,44	0,46	0,34	0,28	0,28	0,34	0,36	0,42	0,38	0,32	0,36	0,32	0,35	0,29	0,23	0,40	0,37	0,28
	P ₂ O ₅	0,11	0,12	0,10	0,10	0,09	0,10	0,104	0,108	0,113	0,098	0,104	0,083	0,092	0,087	0,095	0,106	0,104	0,092
	S	0,21	0,23	0,29	0,30	0,20	0,35	0,347	0,367	0,367	0,340	0,365	0,297	0,246	0,319	0,300	0,366	0,367	0,324
	Cl	0,21	0,22	0,28	0,16	0,14	0,17	0,158	0,176	0,165	0,130	0,163	0,113	0,119	0,129	0,115	0,163	0,164	0,136
	Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	0,01	0,01	0,02	-	-	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00
	Сумма	96,90	98,38	97,32	99,07	99,22	97,47	100,53	100,61	100,28	99,83	100,05	99,18	99,77	98,69	99,01	99,64	98,10	99,13
	Fo оливин	88,41	88,18	89,40	88,64	89,36	87,84	88,41	87,77	89,82	89,02	88,46	88,96	86,22	88,22	81,77	88,61	89,22	88,44
Захваченные составы расплавленных включений после реконструкции	SiO ₂	45,97	45,64	46,87	46,91	46,01	46,57	46,18	47,34	45,98	46,37	46,33	46,79	47,58	46,61	46,06	46,15	46,01	46,75
	TiO ₂	0,80	0,82	0,75	0,75	0,75	0,90	0,78	0,78	0,74	0,77	0,79	0,72	0,75	0,75	0,86	0,85	0,75	0,75
	Al ₂ O ₃	15,66	15,78	14,70	15,61	15,67	15,64	15,42	15,00	14,59	14,99	15,00	15,22	15,73	15,21	18,68	15,02	15,14	14,92
	Fe ₂ O ₃	1,61	1,61	1,65	1,57	1,57	1,58	1,62	1,62	1,71	1,63	1,65	1,58	1,54	1,58	1,44	1,68	1,68	1,60
	FeO	9,01	9,01	8,96	9,04	9,04	9,03	9,00	8,99	8,92	8,99	8,98	9,04	9,07	9,04	9,16	8,94	8,94	9,01
	MnO	0,10	0,09	0,08	0,10	0,09	0,10	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,10	0,08	0,16	0,06	0,07	0,07
	MgO	11,19	10,86	12,54	11,79	12,50	10,78	11,20	10,77	12,74	11,96	11,23	12,17	9,63	11,22	7,04	11,24	11,96	11,43
	CaO	13,06	13,61	12,03	11,76	12,21	12,87	13,19	12,76	12,87	12,96	13,48	12,24	13,06	13,35	14,23	13,36	12,78	13,28
	Na ₂ O	2,12	2,10	2,05	2,15	1,85	2,17	2,18	2,26	2,02	1,97	2,13	1,86	2,17	1,87	2,06	2,33	2,30	1,90
	K ₂ O	0,38	0,38	0,28	0,23	0,23	0,29	0,27	0,32	0,28	0,24	0,27	0,24	0,28	0,23	0,20	0,30	0,28	0,21
	P ₂ O ₅	0,10	0,10	0,08	0,08	0,07	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07
	S	0,18	0,19	0,23	0,25	0,16	0,30	0,26	0,28	0,27	0,25	0,27	0,22	0,20	0,25	0,26	0,27	0,27	0,24
	Cl	0,17	0,18	0,22	0,13	0,12	0,14	0,12	0,13	0,12	0,10	0,12	0,08	0,09	0,10	0,10	0,12	0,12	0,10
	Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	0,01	0,01	0,02	-	-	0,01	0,02	0,01	0,01	-	0,02	-
	T°С, Ford	1273	1264	1305	1288	1300	1262	1273	1264	1310	1289	1273	1292	1231	1269	1146	1277	1295	1274
#Al	0,72	0,74	0,64	0,70	0,68	0,74	0,71	0,71	0,63	0,67	0,69	0,67	0,78	0,70	1,07	0,69	0,68	0,68	
Расчитанные первичные расплавы в равновесии с F _{0,96} -4	SiO ₂	45,69	45,35	46,72	46,61	45,87	46,17	45,90	46,88	45,93	46,16	46,04	46,56	46,84	46,26	45,04	45,89	45,85	46,43
	TiO ₂	0,76	0,77	0,74	0,72	0,73	0,84	0,74	0,73	0,74	0,75	0,75	0,69	0,67	0,71	0,71	0,81	0,73	0,71
	Al ₂ O ₃	14,89	14,92	14,38	14,91	15,30	14,63	14,66	14,00	14,47	14,49	14,28	14,68	14,14	14,37	15,50	14,37	14,74	14,19
	Fe ₂ O ₃	2,02	2,03	2,02	1,98	1,93	2,02	2,04	2,08	2,04	2,01	2,06	1,97	2,06	2,00	2,01	2,09	2,06	2,02
	FeO	8,63	8,63	8,62	8,67	8,71	8,65	8,62	8,60	8,61	8,63	8,60	8,68	8,69	8,66	9,06	8,57	8,59	8,63
	MnO	0,10	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,09	0,07	0,13	0,06	0,07	0,07
	MgO	13,02	12,91	13,31	13,43	13,34	13,19	13,03	13,25	13,01	13,16	13,00	13,46	13,49	13,27	13,79	12,84	12,92	13,25
	CaO	12,41	12,87	11,77	11,23	11,93	12,03	12,54	11,92	12,77	12,53	12,84	11,80	11,74	12,61	11,81	12,78	12,44	12,62
	Na ₂ O	2,02	1,98	2,01	2,06	1,81	2,03	2,07	2,11	2,00	1,90	2,02	1,79	1,95	1,76	1,71	2,22	2,24	1,81
	K ₂ O	0,36	0,36	0,27	0,22	0,22	0,28	0,25	0,29	0,27	0,23	0,26	0,23	0,25	0,21	0,17	0,29	0,27	0,20
	P ₂ O ₅	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0,08	0,08	0,07
	S	0,168	0,177	0,222	0,237	0,158	0,277	0,245	0,258	0,264	0,243	0,262	0,213	0,177	0,232	0,223	0,263	0,263	0,233
	Cl	0,110	0,113	0,133	0,080	0,075	0,088	0,074	0,078	0,074	0,059	0,075	0,052	0,056	0,060	0,067	0,075	0,076	0,061
	Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	0,007	0,008	0,015	-	-	0,008	0,014	0,008	0,008	-	0,015	-

Табл. 10. Содержания редких элементов в стеклах расплавных включений в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат. Оксиды, S, Cl в мас. %, элементы в ppm.

	Образец	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18	MD-18
Измеренные составы	SiO ₂	48,60	47,61	46,96	46,60	46,70
	TiO ₂	1,08	1,03	0,98	0,90	0,91
	Al ₂ O ₃	20,89	20,31	20,02	17,39	17,88
	FeO	4,62	7,38	6,37	7,32	8,94
	MnO	0,06	0,09	0,10	0,15	0,14
	MgO	2,85	2,69	3,63	7,65	5,72
	CaO	16,36	15,63	15,74	14,43	14,43
	Na ₂ O	2,95	2,47	2,53	2,30	2,23
	K ₂ O	0,38	0,26	0,33	0,28	0,26
	S	0,32	0,33	0,35	0,33	0,33
	Cl	0,28	0,13	0,25	0,23	0,08
	Сумма	98,40	97,93	97,25	97,58	97,62
	Fe оливина	89,85	84,89	88,66	88,48	87,87
	Захваченные составы расплавных включений после реконструкции	SiO ₂	46,25	46,93	46,15	46,49
TiO ₂		0,78	0,87	0,78	0,80	0,80
Al ₂ O ₃		15,12	17,22	15,94	15,44	15,80
Fe ₂ O ₃		1,66	1,46	1,56	1,59	1,53
FeO		8,96	9,15	9,05	9,02	9,08
MnO		0,04	0,08	0,08	0,13	0,12
MgO		12,94	8,73	11,62	11,42	10,97
CaO		11,84	13,25	12,54	12,82	12,75
Na ₂ O		2,14	2,09	2,02	2,04	1,97
K ₂ O		0,28	0,22	0,26	0,25	0,23
S		0,23	0,28	0,27	0,29	0,29
Cl		0,20	0,11	0,19	0,20	0,07
T°C, Ford		1316	1203	1282	1277	1264
#Al		0,65	0,90	0,72	0,71	0,74
Рассчитанные первичные расплавы в равновесии с Fo ₉₀₋₄	SiO ₂	46,20	46,09	45,90	46,19	46,33
	TiO ₂	0,78	0,76	0,75	0,76	0,75
	Al ₂ O ₃	15,01	15,04	15,25	14,70	14,77
	Fe ₂ O ₃	2,00	1,99	1,96	2,00	1,98
	FeO	8,65	8,84	8,69	8,65	8,69
	MnO	0,04	0,07	0,08	0,13	0,12
	MgO	13,17	13,62	13,22	13,21	13,38
	CaO	11,76	11,58	11,99	12,20	11,92
	Na ₂ O	2,12	1,83	1,93	1,94	1,84
	K ₂ O	0,27	0,19	0,25	0,24	0,22
	S	0,227	0,245	0,258	0,275	0,270
	Cl	0,126	0,071	0,122	0,122	0,044
Рассчитанные первичные расплавы в равновесии с Fo ₉₀₋₄	Ti	6176	4948	5545	5081	4014
	Cr	28,0	43,0	27,2	65,9	209
	Rb	146	97,2	85,1	57,9	22,4
	Sr	187	173	227	231	248
	Ba	122	69,8	95,1	81,1	72,7
	Ce	11,9	6,92	8,71	8,44	6,87
	Sm	3,22	2,22	2,53	2,40	2,06
	Hf	2,11	1,61	1,69	1,55	1,36
	Th	0,63	0,31	0,45	0,39	0,33
	U	0,29	0,16	0,21	0,16	0,14
	Ta	0,53	0,28	0,33	0,32	0,28
	Lu	0,44	0,40	0,40	0,38	0,29
	Dy	4,65	3,36	3,80	3,54	2,61
	Nd	9,61	6,87	7,83	7,30	5,16
	Pr	1,68	1,12	1,29	1,21	0,90
	La	4,42	2,84	3,13	3,03	2,30
	Nb	0,85	0,51	0,61	0,63	0,42
	Zr	53,0	36,5	42,5	38,8	27,1
	Y	25,7	19,1	21,6	20,4	14,0
	V	435	363	377	330	259
	Gd	4,59	3,35	3,19	3,45	3,06
	Yb	3,41	2,51	2,65	2,35	2,16
Eu	1,21	0,89	0,98	0,94	0,66	
Er	3,12	2,43	2,72	2,64	2,17	
H	1,31	0,55	1,51	0,37	0,01	

Табл. 11. Содержание CO₂ в природнозакаленных расплавленных включениях в оливине из обр. МД-5 в. Меньший Брат (рассчитано по методике в (Мионов и др., 2020))

Номер образца	Номер расплавленного включения				Плотность углекислоты в пузырьке, г/см ³	Диаметр пузыря, мкм	Длина включения, мкм	ширина включения, мкм	толщина включения, мкм	Толщина умножена на показатель преломления	Абсолютная масса CO ₂ в газовом пузырьке	Масса стекла расплавленного включения	Общая масса расплавленного включения	Масса углекислоты в расплавленном включении	Масса CO ₂ с учетом постзахватной кристаллизации оливина на стенках включения*	Масса CO ₂ в исходном расплаве, равновесном с оливинном F _{0,90}
	Левый пик диады Ферми	Правый пик диады Ферми	Расстояние между пиками диады Ферми													
MD-5 O1 1	1a	1285,039	1388,195	103,156	0,101	12	97	28	10	16,800	91,11	62061,46	62152,58	0,15	0,13	0,12
MD-5 O1 1	103a	1284,536	1387,827	103,291	0,152	12,5	95	15	20	33,600	155,11	64925,68	65080,79	0,24	0,21	0,20
MD-5 O1 1	116b	1285,187	1388,418	103,231	0,129	13	33	32	14	23,520	148,42	32005,77	32154,19	0,46	0,41	0,39
MD-5 O1 1	257a	1285,434	1388,641	103,207	0,120	8	19	16	10	16,800	32,16	6496,12	6528,28	0,49	0,43	0,41
MD-5 O1 1	268a	1285,255	1388,478	103,223	0,126	15	40	25	23	38,640	222,66	49853,25	50075,91	0,44	0,39	0,37
MD-5 O1 1	379a	1285,403	1388,555	103,152	0,099	20	67	37	21	35,280	415,50	112329,37	112744,87	0,37	0,32	0,31
MD-5 O1 2	68a	1285,028	1388,201	103,173	0,107	7	18	15	6	10,080	19,24	3362,57	3381,81	0,57	0,50	0,48
MD-5 O1 2	73a	1285,839	1388,927	103,088	0,075	8	22	15	6	10,080	20,11	3978,65	3998,76	0,50	0,44	0,42
MD-5 O1 2	98a	1285,738	1388,873	103,135	0,093	10	30	21	12	20,160	48,58	16541,13	16589,70	0,29	0,26	0,24
MD-5 O1 2	98b	1286,029	1389,061	103,032	0,054	5	15	11	4	6,720	3,53	1390,77	1394,30	0,25	0,22	0,21
MD-5 O1 2	159a	1285,526	1388,765	103,239	0,132	9	30	16	7	11,760	50,40	6949,34	6999,74	0,72	0,63	0,60
MD-5 O1 2	169a	1285,891	1388,975	103,084	0,074	5	32	14	9	15,120	4,81	9399,19	9404,00	0,05	0,05	0,04
MD-5 O1 2	169b	1285,682	1388,862	103,180	0,110	4	17	13	5	8,400	3,68	2533,87	2537,55	0,14	0,13	0,12
MD-5 O1 2	186a	1285,022	1388,233	103,211	0,121	10	55	13	13	21,840	63,60	20661,71	20725,31	0,31	0,27	0,26
MD-5 O1 2	197a	1285,414	1388,636	103,222	0,126	13	59	46	18	30,240	144,51	112916,39	113060,90	0,13	0,11	0,11
MD-5 O1 2	201a	1285,806	1388,862	103,056	0,063	18	57	35	11	18,480	192,21	43874,25	44066,46	0,44	0,38	0,36
MD-5 O1 2	219a	1285,289	1388,517	103,228	0,128	15	46	36	12	20,160	226,00	42424,33	42650,33	0,53	0,47	0,44
MD-5 O1 2	245a	1285,753	1388,775	103,022	0,050	8	26	15	8	13,440	13,43	6686,12	6699,55	0,20	0,18	0,17
MD-5 O1 2	295a	1284,799	1388,013	103,214	0,123	7	20	17	10	16,800	22,02	7590,02	7612,04	0,29	0,25	0,24
MD-5 O1 2	295b	1284,711	1387,823	103,112	0,084	4	12	7	4	6,720	2,82	707,52	710,33	0,40	0,35	0,33
MD-5 O1 2	302a	1284,887	1387,960	103,073	0,069	5	13	6	4	6,720	4,54	564,28	568,82	0,80	0,70	0,67
MD-5 O1 2	302b	1284,799	1387,875	103,076	0,070	4	15	5	4	6,720	2,36	622,02	624,38	0,38	0,33	0,32

Табл. 12. Содержание (отн. %) летучих компонентов в оливине и плагиоклазе из базальтов, пироксенах и кварце из риолитов вулкана Меньший Брат (по данным ГХ-МС).

Наименование	MW	МД-18 ОI	МД-18 PI	МД-22 CPx	МД-22 Opх	МД-22 Qtz	Кудрявый Ф	Горелый Ф
Алифатические углеводороды:		6,74	25,56	8,74	15,29	12,53	0,02	<0,01
Алканы ($CH_4-C_{17}H_{36}$)	16-240	2,48	8,08	4,31	8,55	7,49	0,02	<0,01
Галогеналканы ($C_2H_4Cl-C_{14}H_{29}Cl$)	98-232	0,96	9,00	0,11	1,03	0,06	-	-
Алкены ($CH_2-C_{17}H_{34}$)	14-238	3,30	8,48	4,10	5,69	4,98	-	-
Галогеналкены ($C_3H_3Cl-C_6H_{11}Cl$)	74-118	0,00	0,00	0,22	0,02	0,00	-	-
Циклические углеводороды:		1,84	2,93	1,93	1,49	1,38	0	0
Циклоалканы и циклоалкены ($C_5H_{10}-C_{10}H_{16}$)	70-136	0,15	0,27	0,10	0,08	0,03	-	-
Арены ($C_6H_6-C_5H_{24}$)	78-204	1,64	2,27	1,65	1,28	1,13	-	-
Полициклические ароматические углеводороды ($C_{10}H_8-C_{14}H_{10}$)	128-178	0,06	0,38	0,19	0,13	0,22	-	-
Кислородсодержащие углеводороды:		75,51	57,81	66,32	41,33	35,09	0	0
Спирты ($CH_4O-C_{10}H_{22}O$)	32-158	51,76	7,62	10,33	3,26	0,99	-	-
Эфиры ($C_5H_8O-C_{16}H_8F_6O_3$)	84-362	2,83	7,49	29,32	8,17	8,45	-	-
Альдегиды ($C_2H_4O-C_{16}H_{32}O$)	44-240	7,35	16,01	6,55	11,05	10,41	-	-
Кетоны ($C_3H_6O-C_{15}H_{30}O$)	58-226	6,46	8,31	5,29	3,98	5,80	-	-
Карбоксильные кислоты ($C_2H_4O_2-C_{14}H_{28}O_2$)	60-228	7,11	18,38	14,83	14,87	9,45	-	-
Гетероциклические соединения:		0,46	1,36	0,53	0,52	0,65		
Диоксаны ($C_4H_8O_2$)	88	0,06	0,16	0,03	0,02	0,02	-	-
Фураны ($C_5H_6O-C_{15}H_{26}O$)	82-222	0,40	1,20	0,50	0,50	0,63	-	-
Прочие углеводороды:		4,44	4,65	2,88	4,56	2,68	0	0
Азотсодержащие соединения ($CHNO-C_{10}H_{23}NO_2S$)	43-221	3,68	3,79	2,38	4,09	2,02	-	-
Серосодержащие соединения ($CH_4S-C_{13}H_{22}S$)	48-210	0,85	0,65	0,45	0,38	0,23	-	-
Фосфорсодержащие соединения ($C_3H_9O_3P-C_6H_{14}FO_2P$)	124-168	0,00	0,22	0,05	0,10	0,43	-	-
Неорганические соединения:		11,01	7,68	19,60	36,81	47,67	100,01	99,95
NH_4	18	0,09	-	-	-	-	-	-
H_2	2	-	-	-	-	-	0,57	0,36
H_2S	34	0,02	-	0,02	-	-	0,41	-
HCl	36	-	-	-	-	-	0,37	0,97
HF	20	-	-	-	-	-	0,03	0,15
COS	60	0,02	0,03	0,03	0,08	0,04	-	-
SO_2	64	5,50	1,44	1,47	0,72	2,73	1,33	2,04
CS_2	76	0,77	0,24	0,13	0,11	0,15	-	-
CO	28	-	-	-	-	-	0,03	0,01
CO_2	44	1,08	2,31	1,64	15,63	29,11	2	2,16
H_2O	18	0,33	1,42	13,24	17,35	13,55	95,01	94,2
Ar	40	0,09	0,08	0,01	0,04	0,03	0,01	<0,01
Xe	131	0,06	0,30	0,09	0,10	0,07	-	-
N_2	28	2,87	1,69	2,92	2,66	1,93	0,21	0,05
O_2	32	0,18	0,17	0,05	0,11	0,08	0,04	0,01
Общее количество компонентов		225	222	230	227	242	12	12

Примечание: MW-номинальная масса. «-» - соединение не обнаружено.

Ф-1 составы фумарольных газов вулкана Кудрявый из работы [Taran et al., 1995].

Ф-2 составы фумарольных газов вулкана Горелый из работы [Чаплыгин и др., 2015].

Табл. 13. Состав стекол расплавных включений в плагиоклазе из базальтов вулкана Меньший Брат (мас. %).

Образец	Состав													Т, °С	Минерал- хозяин	Состав							Сумма
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cl	Total			SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O		
MD-3	74,75	1,01	8,59	6,47	-	1,08	2,92	2,80	2,06	-	-	0,37	100,03	904	Pl	52,46	29,82	0,83	12,79	4,10	-	100,01	
MD-3	74,65	1,14	8,76	6,62	0,23	1,05	3,19	2,90	2,08	-	-	0,27	100,88	910	Pl	52,46	29,82	0,83	12,79	4,10	-	100,01	
MD-3	74,34	1,11	9,63	4,91	-	0,52	2,03	2,47	3,80	-	-	0,26	99,07	910	Pl	50,97	31,06	0,76	13,65	3,56	-	100,00	
MD-3	74,53	1,07	8,85	6,11	0,19	0,97	3,39	3,02	2,19	-	-	0,38	100,68	913	Pl	51,74	30,30	0,88	13,23	3,86	-	100,00	
MD-3	74,05	1,15	9,06	6,19	0,17	1,00	3,64	2,33	2,21	-	-	0,34	100,14	919	Pl	51,74	30,30	0,88	13,23	3,86	-	100,00	
MD-3	73,50	1,41	8,61	6,81	0,19	1,12	3,52	2,76	2,22	-	-	0,42	100,57	914	Pl	53,17	29,33	0,68	12,50	4,31	-	99,99	
MD-3	76,60	0,92	8,26	5,85	0,23	1,11	2,86	2,44	2,30	-	-	0,17	100,74	895	Pl	53,17	29,33	0,68	12,50	4,31	-	99,99	
MD-3	74,50	1,21	8,72	6,27	0,18	0,98	2,94	3,10	2,16	-	-	0,33	100,39	907	Pl	52,67	29,62	0,72	12,64	4,21	0,13	100,00	
MD-3	76,13	0,82	8,70	5,82	-	0,87	2,82	2,91	2,27	-	-	0,37	100,70	902	Pl	52,67	29,62	0,72	12,64	4,21	0,13	100,00	
MD-3	73,63	1,04	8,98	5,87	-	0,95	3,19	3,20	2,37	-	-	0,38	99,60	915	Pl	52,43	29,78	0,80	12,68	4,32	-	100,01	
MD-3	74,96	0,96	8,76	5,98	0,23	0,94	3,02	2,78	2,13	-	-	0,31	100,05	907	Pl	52,85	29,54	0,75	12,50	4,27	0,10	100,01	
MD-3	75,51	1,30	8,68	5,38	0,10	0,93	2,63	2,73	2,29	-	-	0,33	99,89	901	Pl	50,23	31,33	0,80	14,47	3,06	0,12	100,01	
MD-3	75,48	1,39	8,68	5,50	-	0,92	2,50	2,71	2,27	-	-	0,34	99,78	900	Pl	50,23	31,33	0,80	14,47	3,06	0,12	100,01	
MD-3	74,39	0,97	9,26	5,65	0,21	0,89	3,13	3,24	2,84	-	-	0,33	100,90	916	Pl	50,92	30,81	0,74	13,82	3,57	0,14	100,01	
MD-5	71,53	0,86	12,77	4,14	0,03	0,66	3,56	4,14	1,59	-	-	0,23	99,52	974	Pl	52,15	30,11	0,76	13,06	3,85	0,07	100,00	
MD-5	71,79	0,95	12,96	4,21	-	0,60	3,21	3,65	1,71	-	-	0,25	99,34	973	Pl	52,42	29,94	0,75	12,88	3,91	0,10	100,00	
MD-5	69,73	1,12	12,81	4,97	0,11	0,74	4,32	3,92	1,56	-	-	0,25	99,51	987	Pl	51,62	30,47	0,80	13,48	3,57	0,07	100,00	
MD-13	68,09	0,88	12,67	6,08	-	1,03	4,96	3,92	1,40	-	-	0,19	99,22	996	Pl	52,35	29,72	0,84	13,09	3,99	-	99,99	
MD-13	70,01	1,01	11,93	5,57	-	0,95	4,69	3,94	1,64	-	-	0,16	99,90	978	Pl	52,35	29,72	0,84	13,09	3,99	-	99,99	
MD-13	69,74	1,14	11,83	5,85	-	1,00	4,61	3,99	1,77	0,16	-	0,18	100,26	976	Pl	50,37	31,01	0,94	14,59	3,1	-	100,01	
MD-13	67,05	1,02	12,78	6,04	-	1,06	5,45	3,86	1,59	0,18	-	0,16	99,19	1005	Pl	50,37	31,01	0,94	14,59	3,1	-	100,01	
MD-13	67,59	0,99	12,58	5,92	-	1,01	5,33	3,69	1,58	-	-	0,17	98,86	1000	Pl	50,37	31,01	0,94	14,59	3,1	-	100,01	
MD-13	67,21	1,17	13,36	5,86	-	0,99	5,48	4,14	1,38	0,22	-	0,17	99,99	1013	Pl	50,37	31,01	0,94	14,59	3,1	-	100,01	
MD-13	66,02	1,11	13,61	5,96	-	1,00	5,95	3,71	1,27	0,16	-	0,16	98,95	1026	Pl	50,37	31,01	0,94	14,59	3,1	-	100,01	
MD-13	67,34	1,09	13,47	5,99	-	0,94	5,65	3,60	1,48	0,05	-	0,18	99,80	1017	Pl	50,37	31,01	0,94	14,59	3,1	-	100,01	
MD-13	67,16	1,06	13,03	6,03	-	0,84	5,49	3,45	1,61	-	-	0,18	98,85	1010	Pl	50,37	31,01	0,94	14,59	3,1	-	100,01	
MD-13	71,37	1,03	11,40	5,44	-	0,94	4,06	3,06	1,71	-	-	0,06	99,06	961	Pl	50,37	31,01	0,94	14,59	3,1	-	100,01	
MD-13	62,06	0,48	20,81	2,91	-	0,42	8,92	3,35	0,82	-	-	0,07	99,84	1189	Pl	50,37	31,01	0,94	14,59	3,1	-	100,01	
MD-13	72,40	0,99	11,06	4,84	-	0,84	3,91	3,43	1,59	0,08	0,04	0,15	99,32	952	Pl	53,47	28,97	0,94	12,43	4,19	-	100,00	
MD-13	68,65	1,11	12,45	5,92	-	1,03	4,91	3,44	1,40	0,12	0,04	0,17	99,24	991	Pl	49,7	31,58	0,93	14,92	2,87	-	100,00	
MD-13	71,14	0,81	12,62	4,01	-	0,66	4,09	3,94	1,40	0,06	-	0,11	98,83	979	Pl	54,12	28,55	0,81	11,84	4,68	-	100,00	
MD-13	66,62	0,69	15,33	4,87	-	0,82	5,66	3,92	1,28	-	-	0,12	99,31	1046	Pl	52,36	29,87	0,81	13	3,95	-	99,99	
MD-13	66,75	0,63	15,40	4,32	-	0,69	6,00	4,27	1,24	-	-	0,13	99,43	1050	Pl	52,36	29,87	0,81	13	3,95	-	99,99	
MD-13	68,23	0,85	14,32	4,56	-	0,82	5,63	4,14	1,39	0,19	-	0,07	100,21	1026	Pl	53,56	28,9	0,83	12,31	4,39	-	99,99	
MD-13	68,67	0,76	14,41	4,40	-	0,78	5,46	4,00	1,37	0,08	-	0,06	99,99	1024	Pl	53,57	28,84	0,86	12,26	4,47	-	100,00	
MD-13	74,35	0,60	10,58	4,18	-	0,76	3,74	3,46	1,62	-	-	0,03	99,33	939	Pl	53,57	28,84	0,86	12,26	4,47	-	100,00	
MD-13	71,24	1,08	9,61	6,39	0,14	1,13	4,14	2,83	1,78	0,21	-	0,18	98,73	938	Pl	50,85	30,85	0,83	14,23	3,23	-	99,99	
MD-13	70,63	1,49	9,41	6,66	-	1,19	3,88	2,70	1,62	0,19	-	0,22	97,99	934	Pl	52,2	29,9	0,93	13,27	3,7	-	100,00	
MD-13	68,94	1,03	11,17	6,65	-	1,21	4,18	4,05	1,60	0,27	-	0,23	99,33	965	Pl	53,2	29,33	0,81	12,39	4,27	-	100,00	
MD-13	70,29	1,28	9,71	7,53	-	1,41	4,43	2,80	1,70	0,26	-	0,19	99,59	944	Pl	51,48	30,34	0,89	13,74	3,55	-	100,00	
MD-13	70,66	1,26	9,73	6,89	-	1,27	3,98	3,52	1,56	0,19	-	0,20	99,25	939	Pl	49,73	31,6	0,83	14,97	2,87	-	100,00	
MD-13	70,15	1,11	10,35	6,34	-	1,11	4,48	3,12	1,64	-	-	0,19	98,48	954	Pl	49,73	31,6	0,83	14,97	2,87	-	100,00	
MD-13	70,82	1,27	9,89	7,00	-	1,25	4,11	2,89	1,52	0,11	-	0,20	99,06	942	Pl	49,44	31,73	0,78	15,14	2,91	-	100,00	
MD-13	70,68	1,18	10,01	7,00	-	1,24	4,33	3,01	1,79	0,22	-	0,15	99,61	947	Pl	49,44	31,73	0,78	15,14	2,91	-	100,00	
MD-8	67,17	1,08	14,62	5,13	-	0,90	5,58	4,13	1,27	0,09	-	0,13	100,10	1032	Pl	50,69	30,8	0,87	14,34	3,3	-	100,00	
MD-8	66,27	1,02	15,38	4,72	-	0,81	5,87	4,05	1,28	-	-	0,12	99,53	1050	Pl	50,69	30,8	0,87	14,34	3,3	-	100,00	
MD-8	63,48	1,09	15,92	4,99	-	0,93	6,58	4,08	1,25	-	0,08	0,15	98,54	1075	Pl	50,69	30,8	0,87	14,34	3,3	-	100,00	
MD-8	70,23	0,69	14,05	3,85	-	0,59	4,65	4,43	1,40	-	-	0,10	100,00	1007	Pl	52,14	29,89	0,78	13,49	3,7	-	100,00	
MD-8	64,41	0,98	16,01	5,42	-	0,94	6,45	4,02	1,22	-	-	0,14	99,58	1071	Pl	50,47	30,43	0,82	14,23	3,33	-	99,28	
MD-8	64,31	0,89	15,71	5,20	-	0,80	6,67	4,01	1,22	-	-	0,16	98,97	1070	Pl	50,59	30,54	0,83	14,21	3,17	-	99,34	
MD-8	65,24	1,11	16,08	4,89	-	0,80	6,66	3,91	1,17	-	-	0,13	100,00	1072	Pl	50,88	32	0,89	15,15	3,03	-	101,95	
MD-8	68,46	1,19	11,81	5,40	-	0,96	4,57	4,45	1,38	0,19	-	0,18	98,58	979	Pl	52,6	29,63	0,78	12,98	4,02	-	100,01	
MD-8	70,15	1,36	10,91	6,53	-	1,06	4,13	4,07	1,40	0,28	-	0,12	100,00	958	Pl	52,58	29,82	0,93	12,88	4,09	-	100,30	
MD-8	67,55	1,09	13,37	5,22	-	0,94	4,91	4,43	1,32	0,16	-	0,15	99,14	1007	Pl	52,65	29,56	0,9	12,79	4,09	-	99,99	
MD-8	64,66	0,95	15,04	5,90	-	1,02	5,93	4,06	1,16	-	-	0,16	98,88	1050	Pl	51,64	30,08	0,82	13,87	3,59	-	100,00	

Примечание: температура равновесия рассчитана по (Putirka, 2008).

Табл. 14. Состав клинопироксена из базальтов вулкана Меньший Брат (мас. %).

Образец	Номер зерна	Фаза	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Сумма	Wol	Enst	Fs	#Mg
MD-1	1	Кр	52,2	0,58	1,76	13	0,41	13,8	18,7	0,27	100,60	38,90	40,05	21,05	0,66
MD-1	2	Кр	52,3	0,4	1,64	13	0,49	13,9	18,8	0,32	100,92	38,87	39,95	21,17	0,65
MD-1	3	Кр	51,9	0,53	2,08	13	0,45	13,8	19	0,23	100,83	39,34	39,84	20,83	0,66
MD-1	4	Кр	51,7	0,57	2,61	9	0,22	15	19,7	-	98,85	41,39	43,88	14,73	0,75
MD-1	5	Кр	51,9	0,42	1,61	13	0,39	14,2	18,6	-	99,76	38,53	40,89	20,59	0,67
MD-1	6	Кр	50,7	0,5	1,72	14	0,36	13,8	18,2	0,19	98,88	37,93	40,01	22,06	0,64
MD-1	7	Кр	51,1	0,42	1,64	13	0,35	13,6	18,3	0,22	98,62	38,59	39,97	21,45	0,65
MD-1	8	Кр	51,1	0,58	2,89	9,2	0,25	16,1	18,5	-	98,55	38,45	46,57	14,97	0,76
MD-1	9	Кр	51,8	0,57	1,98	14	0,58	14,7	15,9	-	99,40	33,74	43,43	22,83	0,66
MD-1	10	Кр	50,3	0,62	1,49	14	0,49	13,5	17,6	0,31	98,05	37,46	39,83	22,71	0,64
MD-1	11	Кр	50,4	0,53	1,49	14	0,58	13,5	17,4	0,22	97,86	37,04	40,01	22,95	0,64
MD-1	12	Кр	50,7	0,58	1,66	14	0,49	13,5	17,7	0,2	98,71	37,45	39,76	22,79	0,64
MD-1	13	Кр	50,7	0,55	1,66	14	0,44	13,5	17,9	0,22	98,94	37,69	39,55	22,76	0,63
MD-1	14	Кр	51	0,45	1,4	13	0,56	13,5	17,7	0,28	98,16	37,73	40,04	22,23	0,64
MD-1	15	Кр	50,9	0,58	1,27	14	0,46	13,6	17,4	0,2	98,15	36,91	40,27	22,82	0,64
MD-1	16	Кр	51,3	0,45	1,34	14	0,54	14	17,6	0,38	99,35	36,77	40,71	22,53	0,64
MD-1	17	Кр	51,1	0,55	1,49	13	0,4	13,7	18,2	-	98,51	38,30	40,17	21,53	0,65
MD-1	18	Кр	50,5	0,5	3,93	7	-	15,9	20	0,2	98,01	42,10	46,39	11,51	0,80
MD-1	19	Кр	49,8	0,43	3,97	7,2	0,18	16	19,7	0,32	97,60	41,48	46,75	11,76	0,80
MD-1	20	Кр	50,7	0,37	1,38	13	0,52	13,5	17,8	-	97,52	37,91	40,09	22,01	0,65
MD-1	21	Кр	50,8	0,4	1,44	14	0,52	13,5	17,8	0,27	98,55	37,61	39,61	22,78	0,63
MD-1	22	Вк	51,1	0,42	1,85	14	0,57	13,4	18	-	98,97	38,19	39,32	22,49	0,64
MD-1	23	Вк	51,1	0,47	2	12	0,37	14,3	18,1	-	98,05	38,30	42,31	19,40	0,69
MD-1	24	Вк	52,2	0,58	1,61	13	0,45	13,5	18,4	-	100,17	38,60	39,34	22,06	0,64
MD-1	25	Вк	51,3	0,47	1,45	13	0,4	13,3	18,5	-	98,80	38,94	39,08	21,99	0,64
MD-1	26	Вк	51,8	0,45	1,57	13	0,4	13,9	18,2	-	99,70	37,90	40,32	21,77	0,65
MD-1	27	Вк	51,4	0,5	1,66	13	0,53	13,7	18	0,22	99,23	37,94	40,29	21,78	0,65
MD-1	28	ОМ	50,6	0,52	4,46	8,8	0,27	16,1	18,2	0,2	99,11	38,33	47,13	14,55	0,76
MD-1	29	ОМ	50,9	0,52	3,04	9,8	0,34	16,9	16,7	-	98,27	34,90	49,11	16,00	0,75
MD-1	30	ОМ	50,5	0,62	3,72	8,4	0,3	16,3	18,3	-	98,08	38,44	47,74	13,82	0,78
MD-1	31	ОМ	50,3	0,7	2,95	12	0,46	14,6	17,1	0,31	98,43	36,55	43,51	19,94	0,69
MD-3	1	Кр	51,8	0,52	1,55	14	0,31	13,3	18,5	0,3	100,23	38,68	38,63	22,70	0,63
MD-3	2	Кр	52,2	0,4	1,51	14	0,45	14,5	18,4	-	101,01	37,32	41,12	21,56	0,66
MD-3	3	Кр	51,8	0,58	3,95	7	-	16,3	20,9	0,22	100,74	42,54	46,25	11,21	0,80
MD-3	4	Кр	51,8	0,57	4,1	7	-	16	21,3	-	100,73	43,35	45,47	11,18	0,80
MD-3	5	Вк	51,9	0,55	1,47	13	0,45	13,8	18,4	0,23	100,14	38,40	39,84	21,76	0,65
MD-3	6	Вк	52,4	0,55	1,4	14	0,45	14,1	18,5	0,23	101,24	37,89	40,13	21,98	0,65
MD-3	7	Вк	52,1	0,55	1,7	13	0,4	13,7	18,5	-	100,03	38,63	39,91	21,46	0,65
MD-3	8	Вк	52,5	0,53	1,68	13	0,53	13,8	18,6	0,23	101,24	38,49	39,81	21,70	0,65
MD-3	9	Вк	51,5	0,35	1,53	14	0,39	13,5	17,8	0,27	98,95	37,79	39,84	22,37	0,64
MD-3	10	Вк	52	0,53	1,64	13	0,62	14,2	18,3	-	100,72	37,77	40,77	21,46	0,66
MD-3	11	Вк	51,9	0,47	1,74	13	0,46	14	18,2	-	99,91	38,03	40,68	21,29	0,66
MD-3	12	Вк	52	0,4	1,68	13	0,5	14	18,3	0,23	100,45	37,96	40,40	21,64	0,65
MD-3	13	ОМ	51,7	0,62	3	9,7	0,23	17,1	17	0,23	99,63	35,18	49,12	15,70	0,76
MD-3	14	ОМ	51	0,57	2,95	9,4	0,27	15,6	19	-	98,83	39,50	45,18	15,32	0,75

Примечание: кр - кристалл-вкрапленник, ОМ - кристалл основной массы, Вк - твердофазное включение. Миналы и магнезиальность рассчитаны в мол. %.

Табл. 15. Состав ортопироксена из базальтов вулкана Меньший Брат (мас. %).

Образец	Номер зерна	Фаза	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумм	Wol	Enst	Fs	#Mg
MD-1	1	Кр	52,78	0,20	0,93	23,45	0,72	21,19	1,51	100,78	3,06	59,81	37,13	0,62
MD-1	2	Кр	51,94	0,00	0,85	23,53	0,68	20,00	1,89	98,89	3,93	57,87	38,20	0,60
MD-1	3	Кр	51,17	0,25	0,98	23,65	0,61	19,80	1,89	98,35	3,95	57,51	38,54	0,60
MD-1	4	Кр	51,45	0,18	0,70	23,65	0,63	19,88	1,86	98,35	3,88	57,65	38,47	0,60
MD-1	5	Кр	51,34	0,32	0,91	23,62	0,67	19,63	1,82	98,31	3,83	57,42	38,76	0,60
MD-1	6	Кр	51,99	0,00	0,89	23,45	0,74	19,50	1,80	98,37	3,81	57,44	38,75	0,60
MD-1	7	Кр	51,34	0,28	0,76	23,43	0,70	19,72	1,89	98,12	3,97	57,62	38,41	0,60
MD-1	8	Кр	51,43	0,33	0,83	23,94	0,71	19,87	2,01	99,12	4,16	57,19	38,65	0,60
MD-1	9	Вк	52,24	0,18	0,79	22,98	0,68	20,73	2,00	99,60	4,10	59,13	36,77	0,62
MD-1	10	Вк	52,31	0,22	0,87	23,11	0,84	20,94	1,97	100,26	4,01	59,29	36,71	0,62
MD-1	11	ОМ	53,74	0,28	0,60	16,22	0,45	23,71	3,67	98,67	7,44	66,89	25,67	0,72
MD-1	12	ОМ	53,31	0,22	0,66	16,81	0,45	23,10	3,86	98,41	7,86	65,43	26,71	0,71
MD-1	13	ОМ	52,11	0,37	1,53	17,79	0,66	22,22	4,51	99,19	9,15	62,69	28,16	0,69
MD-1	14	ОМ	53,70	0,22	1,62	18,67	0,65	21,72	4,56	101,14	9,24	61,23	29,53	0,67
MD-1	15	ОМ	54,00	0,22	0,89	15,04	0,52	24,08	3,62	98,37	7,41	68,57	24,02	0,74
MD-1	16	ОМ	54,32	0,27	1,15	15,34	0,35	24,48	4,07	99,98	8,12	67,98	23,90	0,74
MD-3	1	Кр	52,50	0,25	0,83	24,07	0,79	20,58	1,97	100,99	3,99	57,97	38,04	0,60
MD-3	2	Кр	52,05	0,28	0,70	22,53	0,75	21,38	1,96	99,65	3,98	60,35	35,68	0,63
MD-3	3	Вк	51,58	0,00	0,53	22,98	0,76	18,72	3,76	98,33	7,88	54,55	37,57	0,59
MD-3	4	Вк	52,01	0,25	0,64	22,44	0,72	19,44	3,93	99,43	8,10	55,78	36,12	0,61
MD-3	5	Вк	52,67	0,22	0,85	22,54	0,85	21,31	1,99	100,43	4,04	60,22	35,73	0,63
MD-3	6	ОМ	52,97	0,50	1,08	18,47	0,58	22,02	4,60	100,22	9,26	61,70	29,03	0,68
MD-3	7	ОМ	53,06	0,22	0,85	18,15	0,74	21,87	4,94	99,83	9,97	61,43	28,60	0,68
MD-3	8	Кр	52,86	0,27	0,74	24,11	0,68	20,53	1,85	101,04	3,76	58,02	38,22	0,60
MD-3	9	Кр	52,61	0,27	0,89	24,10	0,66	20,45	1,90	100,88	3,86	57,87	38,26	0,60
MD-3	10	Кр	52,95	0,32	0,68	24,20	0,74	20,31	1,87	101,07	3,81	57,65	38,54	0,60
MD-3	11	Кр	52,39	0,37	0,72	23,75	0,71	20,61	1,89	100,44	3,85	58,40	37,75	0,61
MD-3	12	Кр	52,63	0,27	0,76	22,98	0,71	21,23	1,79	100,37	3,63	59,96	36,41	0,62
MD-3	13	Кр	52,95	0,30	0,87	22,55	0,65	21,86	1,83	101,01	3,67	61,02	35,31	0,63
MD-3	14	Кр	52,65	0,32	0,77	23,04	0,70	21,19	1,86	100,53	3,77	59,77	36,46	0,62
MD-3	15	Кр	52,78	0,27	0,87	23,39	0,74	21,03	1,89	100,97	3,83	59,22	36,95	0,62
MD-3	16	Кр	52,91	0,25	0,70	23,38	0,70	21,21	1,80	100,95	3,63	59,55	36,82	0,62
MD-3	17	Кр	52,48	0,25	0,76	23,14	0,66	21,08	1,82	100,19	3,70	59,60	36,70	0,62
MD-3	18	Кр	52,14	0,25	0,87	23,80	0,70	20,43	1,89	100,08	3,87	58,14	38,00	0,60
MD-3	19	Кр	52,46	0,25	0,89	24,37	0,71	20,41	1,92	101,01	3,89	57,56	38,55	0,60
MD-3	20	Кр	53,18	0,27	0,79	22,82	0,71	21,62	1,93	101,32	3,87	60,38	35,75	0,63
MD-3	21	Кр	52,99	0,30	0,70	23,75	0,74	20,94	1,90	101,32	3,83	58,77	37,40	0,61
MD-3	22	Кр	53,03	0,25	0,59	23,32	0,75	20,98	1,55	100,47	3,17	59,64	37,19	0,62
MD-3	23	Кр	52,44	0,25	0,77	23,86	0,68	20,55	1,89	100,44	3,85	58,23	37,93	0,61
MD-3	24	Кр	52,78	0,30	0,89	23,26	0,68	21,21	1,79	100,91	3,62	59,67	36,71	0,62
MD-3	25	Кр	52,67	0,22	0,60	24,01	0,81	20,80	1,46	100,57	2,97	58,89	38,14	0,61
MD-3	26	Кр	52,76	0,22	0,85	23,94	0,72	20,66	1,83	100,98	3,71	58,35	37,93	0,61
MD-3	27	Кр	52,71	0,22	0,77	23,65	0,66	21,03	1,85	100,89	3,73	59,03	37,24	0,61
MD-3	28	Кр	53,59	0,20	0,68	24,02	0,79	21,34	1,69	102,31	3,37	59,23	37,40	0,61
MD-3	29	Кр	53,36	0,25	0,57	22,55	0,81	22,17	1,51	101,22	3,02	61,75	35,23	0,64
MD-3	30	Кр	53,01	0,30	0,60	23,52	0,80	21,38	1,48	101,09	2,98	59,99	37,02	0,62
MD-3	31	Кр	52,71	0,28	0,83	24,03	0,67	20,88	1,92	101,32	3,86	58,42	37,72	0,61
MD-3	32	Кр	52,65	0,33	0,87	23,85	0,76	20,75	1,86	101,07	3,77	58,51	37,72	0,61
MD-3	33	Кр	52,41	0,27	0,89	23,30	0,70	20,96	1,82	100,35	3,70	59,31	36,99	0,62
MD-3	34	Кр	52,61	0,25	0,77	24,19	0,71	20,88	1,80	101,21	3,62	58,42	37,97	0,61
MD-3	35	Кр	52,74	0,22	0,76	24,19	0,66	20,96	1,76	101,29	3,53	58,56	37,91	0,61
MD-3	36	Кр	52,50	0,22	0,74	24,02	0,72	20,31	1,87	100,38	3,83	57,82	38,36	0,60
MD-3	37	Кр	52,31	0,27	0,70	23,93	0,70	20,53	1,92	100,36	3,91	58,10	37,99	0,60
MD-3	38	Кр	52,50	0,28	0,77	23,97	0,72	20,76	1,92	100,92	3,88	58,34	37,79	0,61
MD-3	39	Кр	52,71	0,35	0,76	23,16	0,74	21,43	1,90	101,05	3,82	59,88	36,30	0,62
MD-3	40	Кр	52,95	0,28	0,68	23,18	0,76	21,09	1,92	100,86	3,89	59,45	36,66	0,62
MD-3	41	Кр	52,46	0,23	0,81	24,16	0,70	20,51	1,83	100,70	3,72	57,97	38,31	0,60
MD-3	42	Кр	52,20	0,18	0,93	23,79	0,66	20,60	1,68	100,04	3,43	58,60	37,97	0,61
MD-3	43	Кр	52,65	0,23	1,00	24,16	0,68	20,51	1,71	100,94	3,48	58,11	38,40	0,60
MD-14	1	Кр	52,65	0,25	0,74	23,66	0,72	20,89	1,92	100,83	3,88	58,77	37,34	0,61
MD-14	2	Кр	52,78	0,28	0,76	23,68	0,70	20,91	1,87	100,98	3,78	58,84	37,38	0,61

Примечание: кр - кристалл вкрапленник, ОМ - кристалл основной массы, Вк - твердофазное включение.
 Миналы и магнезиальность рассчитаны в мол. %.

Табл. 16. Состав стекол расплавных включений в ортопироксене базальтов вулкана Меньший Брат (мас. %).

Образец	Номер включения	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	P ₂ O ₅	SO ₃	Сумма	Минерал хозяин	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма
MD-3	3a	76,36	0,45	11,78	3,20	0,09	0,50	3,05	2,75	1,44	0,18	0,05	-	99,85	Орх	52,86	0,27	0,74	24,11	0,68	20,53	1,85	101,04
MD-3	10a	75,96	0,37	12,00	2,90	0,00	0,48	3,35	3,09	1,13	0,17	0,14	-	99,56	Орх	52,39	0,37	0,72	23,75	0,71	20,61	1,89	100,44
MD-3	10b	77,11	0,37	11,75	3,09	0,09	0,44	2,95	3,17	1,16	0,17	-	-	100,31	Орх	53,06	0,32	0,85	23,65	0,72	21,03	1,8	101,43
MD-3	17a	72,86	0,57	12,09	3,05	0,09	0,64	3,03	2,76	2,87	0,17	0,20	0,05	98,38	Орх	52,63	0,27	0,76	22,98	0,71	21,23	1,79	100,37
MD-3	17b	74,71	0,52	12,22	3,05	0,11	0,58	3,29	2,62	2,29	0,17	0,17	-	99,73	Орх	52,95	0,3	0,87	22,55	0,65	21,86	1,83	101,01
MD-3	21a	75,61	0,61	12,14	3,17	0,11	0,65	3,33	2,77	1,13	0,16	0,05	0,04	99,76	Орх	52,99	0,3	0,76	23,12	0,75	21,46	1,89	101,27
MD-3	21b	75,79	0,44	12,04	3,28	0,07	0,60	2,91	2,99	1,43	0,15	0,09	0,04	99,83	Орх	52,99	0,3	0,76	23,12	0,75	21,46	1,89	101,27
MD-3	25a	74,65	0,47	12,46	3,20	0,06	0,56	3,63	3,22	1,15	0,18	0,14	0,10	99,82	Орх	52,65	0,32	0,77	23,04	0,7	21,19	1,86	100,53
MD-3	25b	78,39	0,36	11,05	2,79	0,03	0,40	2,65	3,07	1,32	0,15	0,11	-	100,32	Орх	52,78	0,27	0,87	23,39	0,74	21,03	1,89	100,97
MD-3	25c	76,79	0,47	11,57	3,04	0,00	0,43	2,98	3,46	1,36	0,18	0,18	-	100,45	Орх	52,91	0,25	0,7	23,38	0,7	21,21	1,8	100,95
MD-3	28a	73,16	0,58	12,77	3,57	0,13	0,62	3,71	3,49	1,30	0,19	0,19	-	99,70	Орх	52,86	0,25	0,98	24,07	0,68	21,11	1,79	101,74
MD-3	29a	74,98	0,52	12,06	3,49	0,00	0,53	3,32	3,56	1,31	0,16	-	-	99,92	Орх	52,14	0,25	0,87	23,8	0,7	20,43	1,89	100,08
MD-3	29c	75,90	0,41	11,71	3,48	0,13	0,45	3,14	3,39	1,34	0,17	0,18	-	100,32	Орх	53,18	0,27	0,79	22,82	0,71	21,62	1,93	101,32
MD-3	34b	73,13	0,62	11,96	4,18	0,13	0,80	3,60	4,18	1,29	0,89	0,03	0,03	100,85	Орх	53,03	0,25	0,59	23,32	0,75	20,98	1,55	100,47
MD-3	39a	76,61	0,47	12,10	2,92	0,00	0,58	3,18	3,59	1,34	0,15	-	-	100,94	Орх	52,44	0,25	0,77	23,86	0,68	20,55	1,89	100,44
MD-3	43a	73,16	0,55	13,13	3,57	0,09	0,67	4,16	3,56	1,18	0,18	0,16	0,12	100,53	Орх	52,78	0,3	0,89	23,26	0,68	21,21	1,79	100,91
MD-3	43a	73,16	0,59	13,31	3,57	0,15	0,74	3,96	3,69	1,28	0,17	0,23	-	100,85	Орх	52,67	0,22	0,6	24,01	0,81	20,8	1,46	100,57
MD-3	51a	74,71	0,47	12,23	2,86	0,18	0,45	3,09	3,81	1,29	0,30	-	0,12	99,51	Орх	55,32	0,25	1,59	19,57	0,71	22,06	1,93	101,43
MD-3	55a	73,83	0,62	12,52	3,68	0,13	0,62	3,57	3,86	1,23	0,17	0,11	0,17	100,50	Орх	52,91	0,28	0,79	24,33	0,7	20,61	1,85	101,47
MD-3	52a	73,49	0,56	12,31	3,53	0,00	0,70	3,51	3,68	1,50	0,20	0,16	-	99,63	Орх	52,76	0,22	0,85	23,94	0,72	20,66	1,83	100,98
MD-3	57a	73,43	1,20	12,31	3,35	0,08	0,67	3,52	3,66	1,42	0,19	0,15	-	99,98	Орх	52,71	0,22	0,77	23,65	0,66	21,03	1,85	100,89
MD-3	34	72,39	0,62	11,78	4,13	0,14	0,77	3,62	4,09	1,27	0,89	-	0,04	99,75	Орх	53,59	0,2	0,68	24,02	0,79	21,34	1,69	102,31
MD-3	34a	75,66	0,54	11,17	3,51	0,13	0,48	3,15	3,55	1,25	0,82	-	0,12	100,38	Орх	53,36	0,25	0,57	22,55	0,81	22,17	1,51	101,22
MD-3	34b	77,03	0,54	11,81	2,77	0,12	0,45	2,59	3,48	1,55	0,16	0,11	-	100,38	Орх	53,01	0,3	0,6	23,52	0,8	21,38	1,48	101,09
MD-3	39a	76,68	0,41	11,39	3,78	0,00	0,39	2,98	3,30	1,14	0,18	0,14	-	100,61	Орх	52,71	0,28	0,83	24,03	0,67	20,88	1,92	101,32
MD-3	39b	76,09	0,74	12,10	3,08	0,04	0,53	3,08	3,38	1,20	0,15	0,08	0,08	100,39	Орх	52,41	0,27	0,89	23,3	0,7	20,96	1,82	100,35
MD-3	41a	74,36	0,47	12,25	3,20	0,12	0,52	3,36	3,35	1,48	0,17	0,16	-	100,56	Орх	52,61	0,25	0,77	24,19	0,71	20,88	1,8	101,21
MD-3	41b	74,87	0,75	11,91	3,27	0,07	0,57	3,36	3,29	1,35	0,18	0,13	0,10	99,43	Орх	52,74	0,22	0,76	24,19	0,66	20,96	1,76	101,29
MD-3	73a	76,84	0,48	11,32	2,84	0,00	0,45	2,94	3,41	1,41	0,21	0,16	-	99,86	Орх	52,5	0,28	0,77	23,97	0,72	20,76	1,92	100,92
MD-3	85a	75,51	0,47	11,98	3,38	0,12	0,50	3,23	3,50	1,17	0,16	0,00	0,12	100,05	Орх	52,46	0,23	0,81	24,16	0,7	20,51	1,83	100,7
MD-3	88b	74,21	0,64	12,60	2,87	0,12	0,46	3,13	3,66	1,84	0,22	0,06	-	100,13	Орх	52,2	0,4	1,49	12,27	0,44	13,66	19,35	99,81
MD-3	104a	75,67	0,33	12,39	3,30	0,00	0,48	3,53	3,44	0,90	0,16	0,16	-	99,82	Орх	52,2	0,18	0,93	23,79	0,66	20,6	1,68	100,04
MD-3	104b	75,27	0,38	11,89	3,50	0,00	0,40	3,36	3,56	1,00	0,14	0,16	-	100,36	Орх	52,65	0,23	1	24,16	0,68	20,51	1,71	100,94

Табл. 17. Состав стекол расплавленных включений во вкряпленных синклинальных рюпитлов кальдеры Медвежья (мас. %).

Образец	Номер включения	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	F	Total	K ₂ O+Na ₂ O	AB	AN	ORT	ANK	ACNK	T, °C	Минерал хозяин	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Sумм	
MD-22	1	80,89	0,29	9,69	1,02	0,00	0,00	0,28	3,82	2,63	0,00	0,00	0,00	0,26	98,88	6,45	32,32	0,00	15,54	1,06	1,01	878	Pl	52,05	0,00	30,20	0,53	0,00	0,00	0,00	12,97	4,23	0,06	100,04
MD-22	2	78,53	0,32	11,64	1,55	0,10	0,22	1,38	4,23	2,12	0,00	0,00	0,00	0,24	100,33	6,35	35,79	0,33	12,53	1,26	0,99	921	Pl	55,47	0,00	28,07	0,49	0,00	0,00	0,00	10,57	5,52	0,11	100,23
MD-22	3	80,68	0,44	9,00	1,72	0,04	0,29	0,64	3,23	2,65	0,00	0,00	0,00	0,33	99,03	5,89	27,33	0,94	15,66	1,10	0,96	873	Pl	57,32	0,00	26,85	0,48	0,00	0,00	0,00	9,09	6,33	0,14	100,21
MD-22	4	79,19	0,35	10,02	1,19	0,03	0,00	0,50	4,35	2,58	0,00	0,00	0,00	0,30	98,52	6,93	36,81	2,29	15,25	1,01	0,92	889	Pl	56,46	0,00	27,79	0,49	0,00	0,00	0,00	9,88	5,96	0,08	100,65
MD-22	1	80,33	0,30	11,47	1,34	0,00	0,12	1,20	2,59	2,45	0,00	0,00	0,00	0,21	100,01	5,04	21,92	2,00	14,48	1,66	1,26		Орх	52,86	0,27	0,36	23,25	1,47	21,09	1,02	н.п.	н.п.	100,32	
MD-22	2	76,27	0,22	11,96	1,76	0,09	0,81	0,53	3,30	2,46	0,00	0,00	0,00	0,24	97,93	5,76	27,92	2,63	14,54	1,48	1,32		Орх	52,86	0,27	0,36	23,25	1,47	21,09	1,02	н.п.	н.п.	100,32	
MD-22	3	77,49	0,23	10,98	1,26	0,00	0,12	0,49	3,30	1,67	0,00	0,00	0,00	0,22	95,76	4,97	27,92	2,43	9,87	1,52	1,35		Орх	52,86	0,27	0,36	23,25	1,47	21,09	1,02	н.п.	н.п.	100,32	
MD-22	4	76,30	0,50	13,02	1,22	0,11	0,13	1,75	3,58	1,65	0,00	0,00	0,00	0,22	98,46	5,23	30,29	2,68	9,75	1,70	1,20		Орх	52,54	0,23	0,59	22,18	0,99	21,69	1,55	н.п.	н.п.	99,77	
MD-22	5	75,33	0,00	13,70	1,09	0,00	0,22	1,40	3,59	1,72	0,00	0,00	0,18	н.п.	97,38	5,31	30,38	6,95	10,17	1,76	1,33		Орх	52,54	0,23	0,59	22,18	0,99	21,69	1,55	н.п.	н.п.	99,77	
MD-22	6	77,62	0,31	11,79	0,95	0,00	0,00	1,16	3,47	2,01	0,00	0,00	0,00	0,22	97,53	4,98	29,36	5,75	11,88	1,50	1,18		Орх	52,54	0,23	0,59	22,18	0,99	21,69	1,55	н.п.	н.п.	99,77	
MD-22	7	71,08	0,22	9,76	4,73	0,25	3,21	1,16	2,47	1,50	0,00	0,00	0,14	н.п.	94,52	3,97	20,90	5,75	8,86	1,72	1,25		Орх	52,59	0,13	0,43	23,03	1,30	21,31	1,20	н.п.	н.п.	100,00	
MD-22	8	72,70	0,27	10,19	1,01	0,00	0,57	1,13	2,31	1,65	0,00	0,00	0,26	н.п.	90,20	4,06	19,55	5,61	10,34	1,79	1,31		Орх	52,59	0,13	0,43	23,03	1,30	21,31	1,20	н.п.	н.п.	100,00	
MD-22	9	77,19	0,30	11,74	1,01	0,00	0,13	1,32	2,82	1,94	0,00	0,00	0,00	0,21	96,67	4,77	23,86	6,55	11,47	1,74	1,28		Орх	52,59	0,13	0,43	23,03	1,30	21,31	1,20	н.п.	н.п.	100,00	
MD-22	10	78,31	0,37	11,32	1,04	0,00	0,00	1,09	3,01	1,89	0,00	0,00	0,00	0,23	97,49	4,90	25,47	5,40	11,17	1,62	1,26		Орх	52,59	0,13	0,43	23,03	1,30	21,31	1,20	н.п.	н.п.	100,00	
MD-22	11	71,41	0,22	9,35	3,71	0,21	2,08	1,21	2,51	0,82	0,00	0,00	0,12	0,00	91,66	3,33	21,24	6,00	4,84	1,86	1,29		Орх	52,59	0,13	0,43	23,03	1,30	21,31	1,20	н.п.	н.п.	100,00	
MD-22	12	76,66	0,33	11,31	1,03	0,00	0,00	1,23	3,72	1,71	0,00	0,00	0,00	0,20	96,40	5,43	31,48	6,10	10,10	1,42	1,11		Орх	52,78	0,17	0,34	22,52	1,57	21,58	1,09	н.п.	н.п.	100,05	
MD-22	13	75,15	0,38	12,21	1,13	0,00	0,22	2,01	3,32	1,27	0,00	0,00	0,00	0,22	95,93	4,58	28,09	9,98	7,51	1,79	1,16		Орх	52,72	0,28	0,52	22,00	1,02	22,13	1,53	н.п.	н.п.	100,20	
MD-22	1	74,05	0,34	12,65	0,50	0,00	0,00	1,56	3,81	1,93	0,00	0,00	0,00	0,30	н.п.	5,73	32,24	7,74	11,41	1,52	1,13	805	CPX	52,39	0,42	1,30	10,88	0,61	14,38	19,32	0,30	н.п.	н.п.	99,60
MD-22	2	76,74	0,30	12,30	0,49	0,00	0,00	1,33	4,22	2,36	0,00	0,00	0,00	0,22	н.п.	6,58	35,71	6,60	13,95	1,30	1,03	801	CPX	52,39	0,42	1,30	10,88	0,61	14,38	19,32	0,30	н.п.	н.п.	99,60
MD-22	3	77,17	0,12	11,17	0,53	0,00	0,00	1,22	2,79	1,95	0,00	0,00	0,00	0,24	н.п.	4,74	23,61	6,05	11,52	1,67	1,25	784	CPX	52,39	0,42	1,30	10,88	0,61	14,38	19,32	0,30	н.п.	н.п.	99,60
MD-22	4	76,29	0,28	12,46	0,55	0,00	0,00	1,34	3,89	2,37	0,00	0,00	0,00	0,25	н.п.	6,25	32,92	6,65	14,01	1,39	1,09	786	CPX	52,78	0,55	1,40	10,78	0,54	14,64	20,18	0,18	н.п.	н.п.	101,05
MD-22	5	75,72	0,25	11,79	0,52	0,00	0,00	1,49	2,98	1,71	0,00	0,00	0,00	0,21	н.п.	4,68	25,22	7,39	10,11	1,75	1,25	795	CPX	51,52	0,38	1,21	10,58	0,57	14,06	19,53	0,30	н.п.	н.п.	98,34
MD-22	6	75,37	0,29	11,57	0,57	0,06	0,00	1,24	3,42	1,96	0,00	0,00	0,00	0,23	н.п.	5,38	28,94	6,15	11,58	1,49	1,16	795	CPX	51,52	0,38	1,21	10,58	0,57	14,06	19,53	0,30	н.п.	н.п.	98,34
MD-22	7	75,87	0,23	11,49	0,49	0,00	0,06	1,49	3,05	1,85	0,00	0,00	0,00	0,28	н.п.	4,90	25,81	7,39	10,93	1,64	1,18	806	CPX	52,86	0,23	0,85	10,23	0,70	13,91	20,60	0,22	н.п.	н.п.	99,60
MD-22	8	75,85	0,23	11,68	0,49	0,00	0,00	1,36	3,18	2,04	0,00	0,00	0,00	0,24	н.п.	5,22	26,91	6,75	12,06	1,57	1,18	777	CPX	52,86	0,23	0,85	10,23	0,70	13,91	20,60	0,22	н.п.	н.п.	99,60
MD-22	9	73,44	0,20	11,53	0,64	0,15	0,00	1,86	2,95	2,01	0,00	0,00	0,00	0,23	н.п.	4,96	24,96	9,23	11,88	1,64	1,11	803	CPX	51,86	0,43	1,21	10,94	0,70	13,73	19,88	0,26	н.п.	н.п.	99,01
MD-22	10	75,81	0,31	11,21	1,39	0,00	0,00	0,68	4,21	1,85	0,00	0,00	0,00	0,23	н.п.	6,05	35,62	3,77	10,93	1,26	1,10	782	CPX	51,26	0,38	1,02	11,24	0,67	13,50	19,59	0,28	н.п.	н.п.	97,94
MD-22	11	75,76	0,21	12,53	0,58	0,00	0,00	1,39	3,36	2,02	0,00	0,00	0,00	0,29	н.п.	5,38	28,92	6,50	11,11	1,74	1,30	789	CPX	52,16	0,50	1,55	11,50	0,67	14,03	19,21	0,28	н.п.	н.п.	99,90
MD-22	12	76,49	0,19	11,94	0,49	0,00	0,00	1,31	3,01	2,02	0,00	0,00	0,00	0,28	н.п.	5,03	25,47	6,50	11,94	1,67	1,26	788	CPX	52,82	0,40	1,21	11,35	0,49	14,73	19,34	0,26	н.п.	н.п.	100,60
MD-22	13	76,78	0,24	11,53	0,58	0,00	0,05	1,18	2,91	2,02	0,00	0,00	0,00	0,22	н.п.	4,97	24,62	5,85	11,94	1,66	1,27	795	CPX	52,52	0,23	0,76	10,30	0,74	13,78	20,64	0,26	н.п.	н.п.	99,23
MD-22	14	76,38	0,28	12,09	0,41	0,00	0,00	1,30	2,99	1,88	0,00	0,00	0,00	0,24	н.п.	4,82	25,80	6,50	11,11	1,74	1,30	789	CPX	52,16	0,50	1,55	11,50	0,67	14,03	19,21	0,28	н.п.	н.п.	99,90
MD-22	15	76,39	0,25	11,68	0,49	0,05	0,00	1,36	3,08	1,89	0,00	0,00	0,00	0,24	н.п.	4,96	26,06	6,75	11,17	1,65	1,22	788	CPX	52,01	0,47	1,51	11,19	0,59	14,20	19,70	0,38	н.п.	н.п.	100,05
MD-22	16	75,67	0,23	12,09	0,42	0,00	0,00	1,38	3,17	1,96	0,00	0,00	0,00	0,24	н.п.	5,13	26,82	6,85	11,58	1,65	1,23	787	CPX	52,01	0,47	1,51	11,19	0,59	14,20	19,70	0,38	н.п.	н.п.	100,05
MD-22	17	76,43	0,24	11,44	0,48	0,00	0,00	1,17	3,48	2,07	0,00	0,00	0,00	0,18	н.п.	5,55	29,45	5,80	12,23	1,44	1,13	785	CPX	52,01	0,47	1,51	11,19	0,59	14,20	19,70	0,38	н.п.	н.п.	100,05
MD-22	18	77,78	0,25	12,38	0,58	0,07	0,00	1,25	3,19	1,49	0,00	0,00	0,00	0,19	н.п.	4,68	26,99	6,20	8,81	1,80	1,35	788	CPX	51,77	0,37	1,49	11,44	0,50	14,08	19,35	0,28	н.п.	н.п.	99,28
MD-22	19	73,34	0,23	10,62	0,49	0,00	0,30	1,39	2,56	1,82	0,00	0,00	0,00	0,18	н.п.	4,38	21,66	6,90	10,76	1,72	1,22	879	CPX	51,77	0,37	1,49	11,44	0,50	14,08	19,35	0,28	н.п.	н.п.	99,28
MD-22	20	76,54	0,23	11,76	0,44	0,06	0,00	1,46	2,96	1,55	0,00	0,00	0,00	0,20	н.п.	4,50	25,05	7,24	9,16	1,80	1,28	779	CPX	52,59	0,25	1,06	10,34	0,62	14,03	20,20	0,24	н.п.	н.п.	99,53
MD-22	21	75,35	0,26	12,12	0,49	0,04	0,08	1,53	3,28	1,83	0,00	0,00	0,00	0,21	н.п.	5,11	27,7																	

Табл. 18. Состав вкрапленников пироксенов в синкальдерных вулканитах кальдеры Медвежья (мас. %).

Образец	Порода	Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Сумм	Wol	Enst	Fs
MD-12	Андезиты купола	1	51,41	0,43	1,42	11,00	0,53	14,25	19,96	0,27	99,26	41,27	40,98	17,75
MD-12		2	51,74	0,42	1,41	11,08	0,54	14,50	19,69	0,27	99,65	40,58	41,59	17,83
MD-12		3	51,22	0,43	1,51	10,71	0,49	14,29	20,10	0,27	99,01	41,58	41,12	17,30
MD-12		4	51,52	0,43	1,32	10,98	0,67	14,00	20,04	0,27	99,23	41,66	40,51	17,83
MD-12		5	51,62	0,43	1,47	10,86	0,52	14,16	20,09	0,27	99,42	41,62	40,82	17,56
MD-12		6	50,27	0,45	1,45	11,04	0,59	13,99	19,69	0,28	97,75	41,22	40,74	18,04
MD-12		7	51,64	0,43	1,46	10,86	0,53	14,12	20,19	0,27	99,50	41,79	40,67	17,54
MD-12		8	51,67	0,42	1,32	11,08	0,55	13,97	20,05	0,29	99,34	41,65	40,39	17,96
MD-12		9	51,49	0,44	1,35	10,95	0,54	14,23	19,91	0,28	99,17	41,26	41,03	17,71
MD-12		10	51,63	0,42	1,47	10,40	0,48	14,46	20,21	0,25	99,33	41,72	41,52	16,76
MD-12		11	51,03	0,45	1,53	10,79	0,54	14,29	19,96	0,26	98,85	41,36	41,19	17,45
MD-12		12	51,55	0,43	1,40	11,28	0,56	14,06	19,87	0,27	99,42	41,18	40,56	18,26
MD-12		13	51,57	0,44	1,43	11,11	0,53	14,17	19,78	0,26	99,29	41,06	40,93	18,01
MD-12		14	51,09	0,44	1,50	10,84	0,51	14,15	19,98	0,27	98,79	41,51	40,91	17,58
MD-12		15	51,17	0,53	1,95	10,92	0,49	14,07	19,85	0,26	99,25	41,40	40,82	17,78
MD-12		16	51,71	0,41	1,39	10,61	0,52	14,39	20,14	0,25	99,43	41,58	41,32	17,09
MD-12		17	51,61	0,43	1,48	10,71	0,50	14,27	20,09	0,25	99,35	41,59	41,10	17,31
MD-12		18	51,70	0,43	1,47	10,84	0,53	14,18	20,13	0,27	99,54	41,66	40,84	17,51
MD-12		19	51,61	0,41	1,26	10,70	0,68	14,20	20,11	0,29	99,27	41,70	40,98	17,32
MD-12		20	51,60	0,43	1,50	10,71	0,53	14,21	20,32	0,27	99,56	41,94	40,82	17,25
MD-12		21	52,00	0,40	1,25	11,05	0,55	14,18	19,96	0,26	99,65	41,32	40,84	17,84
MD-12		22	51,61	0,40	1,36	10,58	0,51	14,11	20,33	0,26	99,17	42,16	40,71	17,13
MD-12		23	51,33	0,44	1,40	11,15	0,54	13,97	19,90	0,28	99,02	41,43	40,46	18,11
MD-12		24	51,35	0,44	1,40	11,22	0,61	14,09	19,76	0,27	99,15	41,07	40,73	18,20
MD-12		25	51,20	0,42	1,50	10,50	0,49	14,49	20,15	0,26	99,01	41,55	41,55	16,90
MD-12		26	51,55	0,41	1,45	11,07	0,55	14,11	20,00	0,27	99,41	41,43	40,66	17,91
MD-12		27	50,68	0,48	1,73	10,74	0,49	13,96	20,04	0,26	98,38	41,87	40,60	17,53
MD-12		28	51,71	0,41	1,43	10,82	0,52	13,91	20,40	0,27	99,48	42,33	40,15	17,52
MD-12		29	51,60	0,43	1,55	10,77	0,51	14,21	20,06	0,27	99,40	41,58	41,00	17,42
MD-12		30	51,64	0,44	1,44	10,82	0,52	14,30	20,07	0,26	99,49	41,45	41,10	17,45
MD-16		1	52,33	0,38	1,53	11,23	0,57	14,38	19,91	0,32	100,65	40,90	41,10	18,01
MD-16		2	50,66	0,43	1,57	11,03	0,49	13,98	19,64	0,28	98,08	41,17	40,78	18,05
MD-16		3	50,62	0,42	1,36	11,22	0,56	13,85	19,42	0,32	97,77	40,93	40,61	18,46
MD-16		4	50,55	0,42	1,66	10,87	0,54	13,96	19,70	0,28	97,98	41,38	40,80	17,82
MD-16		5	50,08	0,45	1,64	10,83	0,52	13,81	19,91	0,31	97,55	41,85	40,39	17,77
MD-16		6	51,11	0,35	1,44	11,18	0,50	14,03	19,81	0,26	98,68	41,22	40,62	18,16
MD-16		7	52,56	0,38	1,38	11,64	0,56	14,41	19,90	0,31	101,14	40,58	40,89	18,53
MD-16		8	51,62	0,45	1,61	11,01	0,50	14,41	19,97	0,32	99,89	41,08	41,24	17,68
MD-16		9	51,90	0,47	1,55	11,01	0,48	14,53	20,05	0,32	100,31	41,04	41,38	17,59
MD-16		10	51,84	0,40	1,44	10,97	0,54	14,48	20,36	0,31	100,34	41,49	41,06	17,45
MD-16		11	52,33	0,47	1,36	11,55	0,65	14,44	20,09	0,31	101,20	40,84	40,84	18,32
MD-16		12	52,76	0,43	1,36	11,51	0,52	14,21	20,51	0,32	101,62	41,63	40,13	18,24
MD-16		13	51,17	0,37	1,36	11,44	0,59	13,96	19,60	0,31	98,80	40,87	40,51	18,62
MD-16		14	51,47	0,35	1,55	11,10	0,53	14,24	19,76	0,23	99,23	40,96	41,07	17,96
MD-16		15	51,54	-	1,23	10,74	0,49	14,10	20,43	0,23	98,76	42,18	40,51	17,31
MD-16		16	51,69	0,33	1,42	10,10	0,44	14,51	20,50	0,28	99,27	42,21	41,56	16,23
MD-16		17	50,81	0,55	2,12	11,36	0,56	13,58	19,95	0,31	99,24	41,81	39,60	18,58
MD-16		18	50,04	0,65	2,51	11,58	0,54	13,18	20,06	0,34	98,90	42,29	38,66	19,05
MD-16		19	49,89	0,65	2,82	11,59	0,58	13,18	20,01	0,31	99,03	42,22	38,69	19,09
MD-16		20	50,04	0,63	2,89	11,59	0,50	12,95	20,04	0,26	98,90	42,54	38,25	19,21

Примечание: Миналы соответствуют мольным соотношениям.

Табл. 18. (Продолжение)

Образец	Порода	Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Сумм	Wol	Enst	Fs
MD-16	Андезиты купола	21	50,81	0,50	2,00	11,32	0,58	13,43	19,97	0,32	98,93	42,05	39,35	18,60
MD-16		22	51,26	0,47	1,68	11,28	0,58	13,68	20,01	0,31	99,27	41,82	39,78	18,40
MD-16		23	50,70	0,57	2,12	11,27	0,52	13,38	20,12	0,28	98,96	42,33	39,16	18,51
MD-16		24	50,85	0,62	2,36	11,27	0,49	13,20	19,81	0,30	98,90	42,17	39,10	18,73
MD-16		25	50,81	0,48	2,19	11,31	0,62	13,35	19,97	0,30	99,03	42,16	39,21	18,64
MD-16		26	51,58	0,37	1,30	11,62	0,57	13,95	19,53	0,30	99,22	40,68	40,43	18,89
MD-16		27	51,52	0,35	1,28	11,59	0,63	13,98	19,52	0,26	99,13	40,65	40,51	18,84
MD-16		28	51,69	0,43	1,36	11,81	0,66	14,11	19,67	0,35	100,08	40,54	40,46	19,00
MD-16		29	51,19	0,40	1,36	11,71	0,62	13,86	19,62	0,35	99,11	40,84	40,14	19,02
MD-16		30	51,19	0,38	1,25	11,64	0,62	13,95	19,63	0,31	98,97	40,79	40,33	18,88
MD-16		31	52,18	0,23	0,81	22,68	0,98	21,36	1,51	-	99,75	3,09	60,74	36,18
MD-16		32	52,93	0,13	0,76	19,22	0,61	24,28	1,50	-	99,43	2,98	67,18	29,83
MD-16		33	52,78	0,20	0,94	19,30	0,59	24,00	1,53	-	99,34	3,06	66,80	30,14
MD-16		34	52,80	0,17	0,93	19,37	0,65	23,90	1,53	-	99,35	3,07	66,64	30,30
MD-16		35	52,80	0,15	0,81	20,07	0,67	23,61	1,48	-	99,59	2,96	65,71	31,33
MD-16		36	52,82	0,15	0,76	20,38	0,68	23,22	1,57	-	99,58	3,15	64,89	31,95
MD-16		37	52,33	0,18	1,25	21,02	0,67	22,77	1,53	-	99,75	3,08	63,85	33,07
MD-16		38	52,05	0,22	1,28	21,28	0,70	22,69	1,54	-	99,76	3,10	63,50	33,41
MD-16		39	51,45	0,27	1,49	21,74	0,79	21,59	2,01	-	99,34	4,10	61,28	34,62
MD-16		40	52,80	-	0,77	20,39	0,67	23,53	1,50	-	99,66	2,99	65,28	31,73
MD-16		41	52,18	-	1,11	22,19	0,89	21,82	1,53	-	99,72	3,11	61,69	35,20
MD-16		42	51,77	0,18	1,10	22,31	0,88	21,87	1,47	-	99,58	2,98	61,71	35,31
MD-16		43	51,43	0,20	0,74	22,23	0,94	21,38	1,48	-	98,40	3,05	61,24	35,72
МД-22	Синкальдерные риолиты	1	52,39	0,42	1,30	10,88	0,61	14,38	19,32	0,30	99,60	40,40	41,84	17,76
МД-22		2	51,52	0,38	1,40	10,58	0,57	14,06	19,53	0,30	98,34	41,25	41,31	17,44
МД-22		3	51,86	0,43	1,21	10,94	0,70	13,73	19,88	0,26	99,01	41,83	40,20	17,97
МД-22		4	51,26	0,38	1,02	11,24	0,67	13,50	19,59	0,28	97,94	41,55	39,84	18,61
МД-22		5	52,78	0,55	1,40	10,78	0,54	14,64	20,18	0,18	101,05	41,21	41,60	17,18
МД-22		6	52,82	0,40	1,21	11,35	0,49	14,73	19,34	0,26	100,60	39,72	42,09	18,19
МД-22		7	52,52	0,23	0,76	10,30	0,74	13,78	20,64	0,26	99,23	43,13	40,07	16,80
МД-22		8	52,86	0,23	0,85	10,23	0,70	13,91	20,60	0,22	99,60	42,97	40,37	16,66
МД-22		9	52,16	0,50	1,55	11,50	0,67	14,03	19,21	0,28	99,90	40,27	40,92	18,82
МД-22		10	52,31	0,38	1,36	10,56	0,57	13,73	20,78	0,27	99,96	43,18	39,69	17,13
МД-22		11	53,03	0,40	1,27	11,10	0,58	14,24	20,05	0,28	100,95	41,32	40,83	17,85
МД-22		12	51,77	0,37	1,49	11,44	0,50	14,08	19,35	0,28	99,28	40,42	40,92	18,65
МД-22		13	52,01	0,47	1,51	11,19	0,59	14,20	19,70	0,38	100,05	40,88	41,00	18,12
МД-22		14	52,59	0,25	1,06	10,54	0,62	14,03	20,20	0,24	99,53	42,13	40,71	17,16
МД-22		15	51,88	0,32	1,19	10,50	0,67	13,93	19,95	0,23	98,67	41,98	40,78	17,24
МД-22		16	53,51	0,28	0,93	9,91	0,79	14,56	20,79	0,23	101,00	42,62	41,53	15,86
МД-22		17	53,68	0,27	0,91	10,58	0,75	14,33	21,02	0,31	101,85	42,71	40,51	16,78
МД-22		18	53,14	0,15	0,25	23,34	1,23	21,04	1,34	-	100,49	2,74	59,95	37,31
МД-22		19	53,23	0,18	0,57	22,49	1,11	21,77	1,78	-	101,13	3,59	61,04	35,37
МД-22		20	52,78	0,22	0,49	22,86	1,18	21,26	1,32	-	100,11	2,71	60,69	36,61

Примечание: Миналы соответствуют мольным соотношениям.

Табл. 19. Содержание редких элементов в клинопироксене из базальтов, андезитов и риолитов вулкана Меньший Брат (ppm).

Образец	MD-22	MD-22	MD-22	MD-22	MD-22	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	
SiO ₂	52,16	53,1	51,99	51,79	51,86	51,56	51,32	51,37	51,28	51,52	52,01	51,71	51,64	49,57	51,19	51,39	51,07	51,6
TiO ₂	0,43	0,33	0,37	0,47	0,42	0,43	0,42	0,45	0,57	0,47	0,37	0,52	0,45	0,57	0,4	0,47	0,43	0,45
Al ₂ O ₃	1,17	0,87	1,21	1,59	1,1	1,49	1,42	1,49	1,45	1,44	1,27	1,53	1,47	5,23	1,34	1,49	1,49	1,51
FeO	11,1	10,2	10,76	13,14	11,99	13,46	13,59	13,35	13,44	12,92	10,54	13,75	12,92	6,14	12,93	13,44	13,17	13,46
MnO	0,63	0,76	0,68	0,41	0,56	0,39	0,44	0,46	0,37	0,44	0,53	0,49	0,43	0,17	0,5	0,46	0,44	0,39
MgO	14,13	14,49	14,2	13,95	13,9	13,83	13,48	13,65	13,56	13,75	14,03	13,68	13,85	14,79	13,95	13,65	13,76	13,7
CaO	19,38	20,51	20,19	18,64	19,56	18,44	18,48	18,48	18,32	18,68	20,37	18,16	18,82	21,72	18,64	18,51	18,43	18,33
Na ₂ O	0,22	0,19	0,19	0,2	0,22	0,19	0,13	0,2	0,12	0,15	0,19	0,22	0,23	0,15	0,16	0,18	0,22	0,12
Сумма	99,22	100,45	99,59	100,19	99,61	99,79	99,28	99,45	99,11	99,37	100,06	99,81	98,34	99,11	99,59	99,01	99,56	99,14
Rb	-	3,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,59	-	-	-
Ba	1,68	38,0	0,19	0,18	-	-	0,59	-	-	0,10	0,03	0,07	0,15	0,00	8,82	0,66	0,04	0,18
Th	-	0,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,06	-	-	-
U	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nb	-	0,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,03	-	-	-
Ta	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La	1,12	2,82	1,86	0,58	0,60	0,49	0,53	0,59	0,56	0,53	1,05	0,54	0,62	0,10	0,65	0,55	0,56	0,47
Ce	5,05	11,3	9,13	3,03	3,52	2,93	2,66	3,16	3,01	3,10	5,78	2,83	3,17	0,63	3,05	3,02	2,77	2,67
Pb	0,39	2,00	-	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,15	0,08	0,13	-	0,56	0,17	0,08	0,08
Pr	1,21	2,73	1,86	0,78	0,96	0,75	0,67	0,84	0,85	0,80	1,53	0,75	0,88	0,16	0,82	0,81	0,71	0,73
Nd	9,33	19	15	5,76	7,69	5,98	5,25	6,80	6,67	6,26	12,1	5,62	6,43	1,30	6,43	6,46	6,15	5,94
Sr	16,6	22,9	16,3	13,2	13,4	12,9	15,6	12,7	13,5	14,6	12,7	13,1	15,7	14,9	14,6	15,6	13,0	13,2
Sm	4,84	9,18	6,91	3,25	4,24	3,11	2,94	3,78	3,45	3,59	6,76	2,97	4,00	0,69	3,30	3,72	3,25	2,99
Zr	16,7	79,9	19,2	15,6	16,2	16,6	14,8	19,3	18,1	16,4	19,9	16,0	18,6	6,2	16,2	16,7	15,7	14,3
Hf	0,72	2,37	0,93	0,65	0,74	0,77	0,62	0,98	0,81	0,75	0,88	0,71	0,93	0,36	0,81	0,76	0,80	0,75
Dy	1,09	1,56	1,01	0,62	0,80	0,65	0,62	0,71	0,74	0,67	0,97	0,62	0,66	0,27	0,62	0,75	0,73	0,68
Ti	2276	1489	1862	2690	2087	2711	2630	2753	2799	2694	1549	2667	3072	2045	2599	2624	2589	2512
Gd	8,10	14,47	11,47	5,38	7,24	5,28	5,43	6,26	6,05	5,85	10,7	5,4	6,4	1,0	5,8	6,0	5,4	5,4
Tb	1,48	2,70	2,08	0,96	1,39	1,04	0,92	1,20	1,13	1,07	2,02	1,04	1,17	0,21	0,99	1,16	1,03	1,12
Dy	10,6	19,6	15,6	6,8	9,6	7,6	6,8	8,8	8,4	7,8	14,3	7,27	8,61	1,49	7,45	8,23	7,55	7,53
Ho	2,30	4,24	3,43	1,54	2,15	1,63	1,52	1,97	1,78	1,76	3,11	1,59	1,87	0,33	1,58	1,80	1,62	1,64
Y	59,3	107,8	79,2	41,9	55,6	44,0	39,7	51,7	48,5	46,9	81,5	43,2	50,6	8,3	44,3	46,7	44,4	42,4
Er	6,41	12,05	10,43	4,67	6,25	4,84	4,31	5,45	5,13	5,11	8,87	4,85	5,59	0,87	4,69	5,34	4,86	4,62
Tm	0,90	1,70	1,21	0,68	0,84	0,66	0,63	0,81	0,76	0,73	1,26	0,68	0,85	0,12	0,70	0,74	0,71	0,72
Yb	6,34	11,67	8,22	4,51	6,29	4,74	4,30	5,28	5,70	5,07	8,67	4,69	5,38	0,81	4,54	5,25	4,85	4,90
Lu	0,88	1,60	1,21	0,63	0,90	0,65	0,67	0,82	0,79	0,76	1,25	0,67	0,78	0,11	0,70	0,74	0,72	0,74
Ni	5,98	4,31	3,88	18,15	9,03	18,12	18,42	15,76	20,05	19,16	4,04	15,1	21,2	81,8	17,2	15,1	19,2	15,8
Mn	3973	5164	3836	2934	3118	3078	2883	3007	3080	3198	3551	3199	3331	738	2882	3073	2861	2963
Sc	195	276	195	148	167	151	147	163	159	164	192	158	179	122	149	159	152	150
Zr	16,7	79,9	19,2	15,6	16,2	16,6	14,8	19,3	18,1	16,4	19,9	16,0	18,6	6,2	16,2	16,7	15,7	14,3
Co	32,5	24,7	23,5	44,4	36,2	46,9	42,8	45,3	45,5	46,5	26,1	44,7	49,7	22,7	41,4	44,4	43,3	44,1
Li	4,02	4,95	2,71	2,78	2,33	2,60	2,71	2,79	3,34	2,74	2,96	2,83	3,51	0,48	2,74	2,89	2,92	2,66
V	187	106	154	359	227	369	361	342	368	336	130	344	400	256	333	329	330	314
Cs	-	0,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,06	-	-	-
Hf	0,72	2,43	0,77	0,66	0,76	0,89	0,73	0,79	0,88	0,71	0,98	0,75	0,90	0,37	0,82	0,78	0,82	0,83
Cr	3,26	2,16	-	88,6	2,63	13,2	19,1	13,6	32,5	20,5	1,92	28,7	64,9	4167	30,6	19,4	14,9	7,88

Табл. 19. (Продолжение)

Образец	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-1	MD-10	MD-10	MD-10	MD-10	MD-10	MD-10	MD-10	MD-10	MD-10	MD-10	MD-12	MD-12	MD-12
SiO ₂	51,28	51,26	51,58	51,15	51,17	51,41	51,74	51,22	51,52	51,62	50,27	51,64	51,67	51,49	51,63	51,03	51,55	51,57
TiO ₂	0,55	0,45	0,47	0,5	0,47	0,43	0,42	0,43	0,43	0,43	0,45	0,43	0,42	0,44	0,42	0,45	0,43	0,44
Al ₂ O ₃	1,44	1,51	1,3	1,38	1,36	1,42	1,41	1,51	1,32	1,47	1,45	1,46	1,32	1,35	1,47	1,53	1,40	1,43
FeO	13,28	13,46	13,89	13,21	13,17	11,00	11,08	10,71	10,98	10,86	11,04	10,86	11,08	10,95	10,40	10,79	11,28	11,11
MnO	0,44	0,44	0,54	0,43	0,52	0,53	0,54	0,49	0,67	0,52	0,59	0,53	0,55	0,54	0,48	0,54	0,56	0,53
MgO	13,5	13,73	13,76	13,76	13,86	14,25	14,50	14,29	14,00	14,16	13,99	14,12	13,97	14,23	14,46	14,29	14,06	14,17
CaO	18,46	18,3	18,13	18,18	18,19	19,96	19,69	20,10	20,04	20,09	19,69	20,19	20,05	19,91	20,21	19,96	19,87	19,78
Na ₂ O	0,19	0,19	0,19	0,18	0,15	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,27	0,29	0,28	0,25	0,26	0,27	0,26
Сумма	99,34	99,86	98,89	98,79	98,89	99,26	99,65	99,01	99,23	99,42	97,75	99,50	99,34	99,17	99,33	98,85	99,42	99,29
Rb	-	-	-	-	-	-	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba	-	0,08	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Th	-	-	-	-	-	-	-	0,02	-	-	0,02	0,02	-	-	-	-	-	-
U	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,01
Nb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ta	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	-	0,01	0,01	-	-	-	-
La	0,56	0,60	0,51	0,54	0,53	0,73	0,59	0,62	1,00	0,67	0,96	0,92	1,00	0,90	0,61	1,27	1,02	0,83
Ce	3,13	3,34	2,72	2,97	2,90	4,19	4,54	4,47	6,25	4,66	6,05	5,81	7,12	4,88	4,18	5,51	4,21	4,25
Pb	0,08	0,12	0,14	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,18	0,15	0,18	0,17	0,12	0,13	0,07	0,13	0,15	0,12
Pr	0,82	0,85	0,71	0,83	0,79	1,20	1,09	1,16	1,66	1,20	1,46	1,39	1,52	1,39	0,98	1,45	1,28	1,26
Nd	6,70	6,31	5,79	6,30	6,07	7,95	6,68	6,90	9,47	8,27	8,76	8,71	9,66	8,67	6,37	8,90	7,73	7,70
Sr	13,9	14,2	12,9	12,8	12,8	14,5	14,0	15,9	15,9	16,2	15,8	15,2	16,1	17,2	16,0	15,5	15,3	15,1
Sm	3,85	3,75	2,91	3,52	3,45	4,99	4,92	4,95	6,81	5,00	5,23	4,97	6,50	5,77	4,22	6,21	5,25	5,08
Zr	16,9	17,2	12,6	15,8	14,6	15,8	12,7	16,9	20,9	13,6	17,7	15,7	19,4	17,7	11,6	18,4	17,0	17,7
Hf	0,84	0,92	0,61	0,82	0,75	0,69	0,74	0,88	0,95	0,95	0,94	0,89	1,06	0,84	0,59	0,90	0,76	0,77
Dy	0,69	0,71	0,59	0,66	0,65	1,11	1,17	1,08	1,35	1,10	1,25	1,11	1,32	1,08	0,92	1,12	1,15	1,01
Ti	2652	2697	2327	2569	2369	2392	2251	2447	2435	2418	2597	2544	2575	2592	2440	2419	2367	2421
Gd	6,6	6,6	5,50	6,05	6,20	7,75	8,26	7,51	10,98	8,96	9,86	8,23	11,1	8,88	6,62	8,48	9,04	8,53
Tb	1,20	1,21	0,98	1,11	1,11	1,53	1,46	1,49	1,95	1,56	1,78	1,64	2,06	1,82	1,19	1,69	1,55	1,60
Dy	8,60	8,60	7,21	8,35	8,21	10,5	10,2	10,5	15,0	11,9	12,6	10,6	14,6	13,0	8,07	12,8	11,6	9,9
Ho	1,87	1,89	1,56	1,84	1,73	2,31	2,31	2,24	2,92	2,41	2,60	2,48	3,06	2,76	1,90	2,53	2,53	2,40
Y	48,2	48,4	40,5	46,3	44,9	53,5	53,2	55,6	83,3	63,9	61,9	59,8	80,8	68,6	47,9	64,5	64,1	56,5
Er	5,32	5,56	4,63	5,34	5,16	6,18	6,50	6,58	9,00	7,81	8,19	7,59	9,10	8,14	5,73	7,17	7,02	6,51
Tm	0,79	0,79	0,63	0,79	0,73	0,89	0,88	0,96	1,40	0,97	1,09	0,98	1,32	1,08	0,74	1,01	0,96	0,93
Yb	5,24	5,36	4,30	5,25	5,06	5,91	5,65	5,75	8,26	6,62	7,36	6,80	8,28	6,99	5,44	7,35	6,23	6,29
Lu	0,80	0,82	0,67	0,78	0,78	0,90	0,90	0,85	1,20	0,96	1,14	0,96	1,20	1,13	0,80	1,05	0,95	0,97
Ni	16,5	17,9	12,00	13,86	13,00	8,38	6,04	9,58	3,06	7,10	5,69	5,42	9,97	5,21	7,46	6,88	7,99	3,92
Mn	3112	3306	2991	3071	2994	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sc	163	161	150	154	154	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zr	16,9	17,2	12,6	15,8	14,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Co	45,0	47,4	38,8	44,3	41,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Li	2,84	3,30	2,68	2,71	3,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	330	359	265	304	290	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hf	0,72	0,90	0,51	0,86	0,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	12,2	12,9	7,25	8,45	7,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Табл. 19. (Продолжение)

Образец	MD-12	MD-12	MD-12	MD-12	MD-12	MD-12	MD-12	MD-12	MD-16	MD-16	MD-16	MD-16	MD-16	MD-16	MD-16	MD-16
SiO ₂	51,09	51,17	51,71	51,61	51,70	51,61	51,60	52,00	51,61	51,33	51,35	51,20	51,55	51,71	51,60	51,64
TiO ₂	0,44	0,53	0,41	0,43	0,43	0,41	0,43	0,40	0,40	0,44	0,44	0,42	0,41	0,41	0,43	0,44
Al ₂ O ₃	1,50	1,95	1,39	1,48	1,47	1,26	1,50	1,25	1,36	1,40	1,40	1,50	1,45	1,43	1,55	1,44
FeO	10,84	10,92	10,61	10,71	10,84	10,70	10,71	11,05	10,58	11,15	11,22	10,50	11,07	10,82	10,77	10,82
MnO	0,51	0,49	0,52	0,50	0,53	0,68	0,53	0,55	0,51	0,54	0,61	0,49	0,55	0,52	0,51	0,52
MgO	14,15	14,07	14,39	14,27	14,18	14,20	14,21	14,18	14,11	13,97	14,09	14,49	14,11	13,91	14,21	14,30
CaO	19,98	19,85	20,14	20,09	20,13	20,11	20,32	19,96	20,33	19,90	19,76	20,15	20,00	20,40	20,06	20,07
Na ₂ O	0,27	0,26	0,25	0,25	0,27	0,29	0,27	0,26	0,26	0,28	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,26
Сумма	98,79	99,25	99,43	99,35	99,54	99,27	99,56	99,65	99,17	99,02	99,15	99,01	99,41	99,48	99,40	99,49
Rb	-	-	-	-	-	0,37	-	-	-	-	0,22	-	-	-	-	-
Ba	-	-	-	-	-	0,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Th	-	-	0,01	-	0,02	0,00	-	-	-	-	0,01	-	-	0,01	-	-
U	0,01	-	0,01	-	-	0,01	0,01	0,02	0,01	-	-	-	-	0,01	-	-
Nb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ta	-	-	0,01	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La	0,83	1,28	0,86	0,58	1,12	1,30	0,74	1,20	0,78	-	0,93	0,47	0,63	0,87	1,35	0,85
Ce	4,29	4,87	4,82	4,41	4,67	5,53	5,11	5,50	4,86	0,55	4,43	3,56	3,81	4,40	5,22	4,21
Pb	0,12	0,18	0,14	0,13	0,15	0,36	0,12	0,11	0,17	0,02	0,08	0,12	0,12	0,12	0,10	0,14
Pr	1,27	1,17	1,16	1,04	1,05	1,44	1,33	1,25	1,58	0,23	1,47	1,00	1,06	1,01	1,51	1,07
Nd	7,78	7,69	6,38	6,97	6,56	10,6	7,93	8,21	8,91	2,06	7,96	6,67	7,48	7,70	9,16	6,63
Sr	15,3	16,1	16,2	17,3	15,6	18,0	15,4	17,4	17,8	2,2	17,3	16,3	17,1	14,7	17,6	21,8
Sm	5,13	5,15	4,55	4,43	4,16	6,93	5,16	5,31	5,54	1,74	5,49	4,14	4,31	4,51	6,67	4,59
Zr	17,9	19,9	15,1	17,9	15,2	19,0	20,0	16,6	18,7	5,2	16,8	14,2	15,1	17,7	19,7	16,8
Hf	0,77	1,05	0,85	0,67	0,70	0,98	1,08	0,74	1,03	0,19	0,84	0,72	0,85	0,89	1,06	0,66
Dy	1,02	1,10	1,03	1,03	1,02	1,31	1,34	1,17	1,12	0,46	1,00	1,08	1,11	1,02	1,17	1,21
Ti	2447	2521	2501	2339	2336	2346	2374	2435	2512	843	2385	2399	2446	2598	2603	2408
Gd	8,62	9,67	6,85	7,73	8,32	11,09	8,90	9,09	8,62	2,38	8,99	7,39	8,09	9,23	10,4	7,25
Tb	1,62	1,76	1,28	1,37	1,39	2,10	1,61	1,47	1,89	0,54	1,68	1,23	1,48	1,70	1,96	1,39
Dy	10,0	12,0	10,2	10,0	10,3	14,1	11,4	10,8	13,4	3,85	11,8	9,44	10,4	10,8	14,4	9,4
Ho	2,42	2,68	2,20	2,11	2,18	3,19	2,57	2,32	2,75	0,77	2,50	2,06	2,39	2,68	3,00	2,00
Y	57,1	76,3	56,4	57,3	51,9	77,9	66,9	64,8	74,4	24,1	71,0	54,5	59,4	55,6	76,8	54,9
Er	6,58	8,20	6,49	6,19	6,68	8,43	6,88	6,90	8,16	2,77	7,23	5,26	6,47	7,99	8,23	6,30
Tm	0,94	1,02	0,82	0,89	1,01	1,17	1,04	1,06	1,10	0,43	0,99	0,74	0,87	0,92	1,15	0,84
Yb	6,35	7,22	6,20	5,59	5,56	8,02	6,68	6,35	7,14	2,45	7,59	5,31	6,09	7,66	7,87	5,67
Lu	0,98	1,17	0,81	0,77	0,84	1,19	0,97	1,12	1,11	0,30	1,01	0,76	0,95	0,99	1,05	0,85
Ni	3,97	6,91	9,61	10,63	5,57	2,29	6,14	0,00	8,61	1,74	0,00	8,71	3,10	9,01	10,9	6,12
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Li	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Табл. 20. Состав стекол расплавленных включений во кратерниках андезитов купола вулкана Меньший Брат (мас. %).

Образец	Номер включения	Минерал-хозяин														Σ													
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	AN	AB	ORT	ANK		АСНК	T, °С											
MD-12	1	76,52	0,63	7,94	4,39	0,18	0,93	1,93	2,90	2,93	0,23	98,58	0,00	24,53	17,32	1,00	0,69	882	PL	55,32	н.п.о.	27,06	0,53	н.п.о.	10,48	5,36	н.п.о.	98,75	
MD-12	2	77,77	0,62	7,95	3,77	н.п.о.	0,78	1,78	2,91	3,07	0,21	98,86	0,00	23,80	18,14	0,98	0,70	878	PL	55,32	н.п.о.	27,06	0,53	н.п.о.	10,48	5,36	н.п.о.	98,75	
MD-12	3	77,42	0,55	9,47	1,85	н.п.о.	н.п.о.	2,57	2,45	2,24	0,24	96,79	8,23	20,73	13,28	1,47	0,85	903	PL	55,32	н.п.о.	27,06	0,53	н.п.о.	10,48	5,36	н.п.о.	98,75	
MD-12	4	74,00	0,72	9,18	3,68	н.п.о.	0,55	2,22	2,68	4,24	0,19	97,46	0,50	22,67	25,06	1,02	0,70	907	PL	54,23	н.п.о.	27,36	0,64	н.п.о.	10,75	5,23	0,11	98,32	
MD-12	5	78,04	0,40	9,83	1,67	н.п.о.	н.п.о.	0,52	4,00	2,30	0,25	97,01	2,07	33,87	13,59	1,08	0,98	889	PL	53,25	н.п.о.	28,15	0,69	н.п.о.	11,61	4,79	н.п.о.	98,49	
MD-12	6	77,66	0,42	9,79	1,49	н.п.о.	н.п.о.	0,50	4,11	2,29	0,24	96,50	1,50	34,78	13,53	1,06	0,96	889	PL	53,25	н.п.о.	28,15	0,69	н.п.о.	11,61	4,79	н.п.о.	98,49	
MD-12	7	77,49	0,38	9,69	1,51	н.п.о.	н.п.о.	0,55	4,04	2,31	0,24	96,21	1,50	34,19	13,65	1,06	0,96	888	PL	53,25	н.п.о.	28,15	0,69	н.п.о.	11,61	4,79	н.п.о.	98,49	
MD-12	8	77,15	0,60	7,97	2,60	н.п.о.	0,43	3,51	2,59	2,36	0,27	97,48	3,11	21,92	13,95	1,17	0,60	894	PL	51,49	н.п.о.	29,14	0,69	н.п.о.	12,83	4,08	н.п.о.	98,23	
MD-12	9	64,76	0,50	10,62	3,85	0,41	3,25	8,98	2,79	1,51	н.п.о.	96,67	12,02	23,61	8,92	1,71	0,47	1018	PL	51,88	н.п.о.	29	0,64	н.п.о.	12,63	4,27	н.п.о.	98,42	
MD-12	10	64,78	0,47	10,58	4,09	0,36	3,32	9,23	2,26	1,48	н.п.о.	96,57	14,35	19,12	8,74	1,99	0,48	1021	PL	51,88	н.п.о.	29	0,64	н.п.о.	12,63	4,27	н.п.о.	98,42	
MD-12	11	75,43	0,48	12,64	1,34	н.п.о.	0,22	1,99	4,23	1,98	0,22	98,52	9,65	35,79	11,70	1,39	0,99	947	PL	51,88	н.п.о.	29	0,64	н.п.о.	12,63	4,27	н.п.о.	98,42	
MD-12	12	79,65	0,35	10,60	1,12	н.п.о.	0,22	2,01	3,38	1,36	0,20	98,95	9,73	28,60	8,04	1,51	0,99	909	PL	51,88	н.п.о.	29	0,64	н.п.о.	12,63	4,27	н.п.о.	98,42	
MD-12	13	74,34	0,75	8,98	3,34	н.п.о.	0,63	2,04	3,65	2,98	0,25	96,96	0,00	29,60	17,61	0,97	0,69	901	PL	51,88	н.п.о.	29	0,64	н.п.о.	12,63	4,27	н.п.о.	98,42	
MD-12	14	74,77	0,77	9,28	3,33	н.п.о.	0,63	2,20	3,76	3,04	0,24	98,02	0,00	30,81	17,97	0,98	0,69	906	PL	51,88	н.п.о.	29	0,64	н.п.о.	12,63	4,27	н.п.о.	98,42	
MD-12	15	73,47	0,80	8,41	3,33	н.п.о.	0,68	2,34	3,30	2,88	0,22	95,43	0,10	27,22	17,02	0,98	0,66	898	PL	51,88	н.п.о.	29	0,64	н.п.о.	12,63	4,27	н.п.о.	98,42	
MD-12	16	76,16	0,47	11,83	2,61	н.п.о.	0,23	2,20	2,68	3,23	н.п.о.	99,41	10,71	22,67	19,09	1,50	0,99	936	PL	54,45	н.п.о.	28,21	0,55	н.п.о.	11,26	5,08	н.п.о.	99,55	
MD-12	17	76,46	0,45	11,71	2,53	н.п.о.	0,20	2,18	2,63	3,22	н.п.о.	99,38	10,64	22,23	19,03	1,50	0,99	934	PL	54,45	н.п.о.	28,21	0,55	н.п.о.	11,26	5,08	н.п.о.	99,55	
MD-12	18	75,16	0,53	8,03	4,54	н.п.о.	0,61	2,36	2,40	3,43	0,21	97,27	1,00	20,31	20,27	1,05	0,67	889	PL	54,15	н.п.о.	27,47	0,69	н.п.о.	10,91	5,1	н.п.о.	98,32	
MD-12	20	76,74	0,60	8,46	3,98	н.п.о.	0,53	2,20	2,93	3,07	0,28	98,79	1,00	24,79	18,13	1,04	0,70	891	PL	54,15	н.п.о.	27,47	0,69	н.п.о.	10,91	5,1	н.п.о.	98,32	
MD-12	21	78,17	0,60	8,45	3,91	н.п.о.	0,55	2,45	4,19	0,55	0,14	99,01	2,62	35,45	3,25	1,13	0,71	890	PL	54,15	н.п.о.	27,47	0,69	н.п.о.	10,91	5,1	н.п.о.	98,32	
MD-12	22	75,99	0,43	12,04	1,16	н.п.о.	н.п.о.	0,43	5,32	3,07	0,15	98,59	1,00	44,84	18,13	1,00	0,94	923	PL	53,8	н.п.о.	28,04	0,62	н.п.о.	11,28	5,07	н.п.о.	98,81	
MD-12	21	76,14	0,25	11,79	1,54	н.п.о.	0,22	1,80	4,00	1,55	0,21	97,48	8,81	33,85	8,86	1,43	1,03	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	24	74,73	0,22	11,60	1,87	н.п.о.	0,30	1,80	3,52	1,55	0,20	95,79	8,93	29,79	9,16	1,55	1,08	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	25	75,48	0,30	11,87	1,11	н.п.о.	0,36	2,32	3,81	0,59	0,25	96,09	11,51	32,24	3,49	1,72	1,07	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	26	71,09	0,30	10,68	1,27	н.п.о.	0,98	3,53	2,84	0,67	0,22	91,58	14,41	24,03	3,95	1,98	0,90	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	27	75,05	0,35	11,51	0,72	н.п.о.	0,33	2,00	3,50	0,94	0,23	94,63	9,99	29,62	5,55	1,70	1,11	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	28	74,75	0,23	10,35	0,71	н.п.о.	0,48	1,96	3,86	0,36	0,23	92,93	9,72	32,66	2,12	1,54	1,00	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	29	74,96	0,27	11,92	0,55	н.п.о.	0,25	1,92	3,92	0,58	0,27	94,64	9,53	3,17	3,42	1,68	1,13	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	30	73,51	0,35	11,85	0,73	н.п.о.	0,38	2,20	3,88	0,66	0,27	93,83	10,91	32,83	3,90	1,67	1,07	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	31	68,65	0,63	11,53	9,83	0,17	1,41	3,67	4,21	0,36	0,24	100,70	11,50	35,62	2,12	1,58	0,82	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	32	71,84	0,43	10,45	2,52	0,14	2,39	6,37	3,26	0,40	0,21	98,01	12,70	27,59	2,36	1,80	0,60	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-12	33	74,00	0,23	14,17	0,72	н.п.о.	0,22	1,68	4,29	2,63	н.п.о.	97,94	8,34	36,30	15,54	1,43	1,09	-	PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD-10	34	76,47	0,61	9,73	2,86	н.п.о.	0,55	2,36	4,66	2,12	0,24	99,59	8,03	31,14	24,05	0,98	0,68	910	PL	54,64	н.п.о.	28,30	0,64	н.п.о.	11,12	5,18	0,12	100,00	
MD-10	35	78,13	0,73	9,13	3,07	0,15	0,56	2,29	3,48	1,99	0,22	99,75	3,41	29,45	11,76	1,16	0,76	897	PL	64,59	0,38	20,18	1,69	н.п.о.	0,27	7,22	4,60	0,84	99,77
MD-10	36	78,20	0,78	9,00	3,24	н.п.о.	0,65	2,59	3,49	1,96	0,21	100,10	3,10	29,53	11,58	1,15	0,72	898	PL	53,14	н.п.о.	28,74	0,60	н.п.о.	н.п.о.	11,85	4,72	н.п.о.	99,05
MD-10	37	77,04	0,67	9,05	3,23	н.п.о.	0,59	2,57	3,72	2,04	0,23	99,13	2,06	31,31	12,06	1,09	0,70	901	PL	54,92	н.п.о.	28,38	0,69	н.п.о.	н.п.о.	11,17	5,26	0,12	100,54
MD-10	38	77,95	0,67	9,71	3,18	н.п.о.	0,55	2,10	4,71	1,96	0,22	101,05	0,00	39,03	11,58	0,98	0,71	905	PL	52,91	н.п.о.	29,38	0,62	н.п.о.	н.п.о.	12,41	4,53	н.п.о.	99,85
MD-10	39	78,19	0,61	9,58	2,87	н.п.о.	0,50	2,05	4,24	2,05	0,19	100,28	1,05	35,88	12,11	1,04	0,74	901	PL	54,15	н.п.о.	29,14	0,68	н.п.о.	н.п.о.	11,85	4,96	н.п.о.	100,78
MD-10	40	77,31	0,99	9,47	3,67	0,17	0,70	2,81	4,15	2,10	0,26	101,61	1,01	35,12	12,41	1,04	0,67	910	PL	51,79	н.п.о.	30,63	0,63	н.п.о.	н.п.о.	13,36	3,95	н.п.о.	100,36

Примечание: АВ, АН, ОРТ - нормативные содержания альбита, анортита и ортоклаза в стеклах расплавленных включений. Температуры и давления рассчитаны по (Ритика, 2008).

Табл. 20. (Продолжение)

Образец	Номер включения	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Сумм	AN	AB	ORT	ANK	АСНК	Т, °С	Минерал-хозяин	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумм
MD-10	41	76,50	0,90	9,21	3,47	н.п.о.	0,61	2,59	4,18	2,01	0,25	99,70	0,43	35,37	11,88	1,02	0,67	905	PL	51,79	н.п.о.	30,63	0,63	н.п.о.	н.п.о.	13,36	3,95	н.п.о.	100,36
MD-10	42	74,68	0,64	9,36	5,54	0,17	1,64	2,57	4,35	2,09	0,24	101,26	0,00	36,51	13,21	1,00	0,66	913	PL	52,59	н.п.о.	30,61	0,62	н.п.о.	н.п.о.	13,4	4,29	н.п.о.	101,51
MD-16	1	76,14	0,25	11,79	1,54	н.п.о.	0,22	1,78	4,00	1,55	0,21	97,48	8,83	33,85	9,16	1,43	1,03	845	CPX	51,47	0,35	1,55	11,1	0,53	14,24	19,76	0,23	н.п.о.	99,23
MD-16	2	74,73	0,22	11,60	1,87	н.п.о.	0,30	1,80	3,52	1,55	0,20	95,79	8,93	29,79	9,16	1,55	1,08	850	CPX	51,47	0,35	1,55	11,1	0,53	14,24	19,76	0,23	н.п.о.	99,23
MD-16	3	75,48	0,30	11,87	1,11	н.п.о.	0,36	2,32	3,81	0,59	0,25	96,09	11,51	32,24	3,48	1,72	1,07	882	CPX	50,81	0,55	2,12	11,36	0,56	13,58	19,95	0,31	н.п.о.	99,24
MD-16	4	71,09	0,30	10,68	1,27	н.п.о.	0,98	3,53	2,84	0,67	0,22	91,58	14,41	24,03	3,96	1,98	0,90	960	CPX	50,04	0,65	2,51	11,58	0,54	13,18	20,06	0,34	н.п.о.	98,90
MD-16	5	75,05	0,35	11,51	0,72	н.п.о.	0,33	2,00	3,50	0,94	0,23	94,63	9,92	29,62	5,55	1,70	1,11	886	CPX	49,89	0,65	2,82	11,59	0,58	13,18	20,01	0,31	н.п.о.	99,03
MD-16	6	74,75	0,23	10,35	0,71	н.п.о.	0,48	1,96	3,86	0,36	0,23	92,93	9,72	32,62	2,13	1,54	1,00	890	CPX	50,04	0,63	2,89	11,59	0,5	12,95	20,04	0,26	н.п.о.	98,90
MD-16	7	74,96	0,27	11,92	0,55	н.п.о.	0,25	1,92	3,92	0,58	0,27	94,64	9,53	33,18	3,42	1,68	1,13	874	CPX	50,81	0,5	2,00	11,32	0,58	13,43	19,97	0,32	н.п.о.	98,93
MD-16	8	73,51	0,35	11,85	0,73	н.п.о.	0,38	2,20	3,88	0,66	0,27	93,83	10,91	32,83	3,90	1,67	1,07	897	CPX	50,81	0,5	2,00	11,32	0,58	13,43	19,97	0,32	н.п.о.	98,93
MD-16	9	68,65	0,63	11,53	9,83	0,17	1,41	3,67	4,21	0,36	0,24	100,70	11,50	35,62	2,13	1,58	0,82	920	CPX	50,7	0,57	2,12	11,27	0,52	13,38	20,12	0,28	н.п.о.	98,96
MD-16	10	71,84	0,43	10,45	2,52	0,14	2,39	6,37	3,26	0,40	0,21	98,01	12,70	27,59	2,36	1,80	0,60	1040	CPX	50,85	0,62	2,36	11,27	0,49	13,2	19,81	0,3	н.п.о.	98,90
MD-16	11	74,00	0,23	14,17	0,72	н.п.о.	0,22	1,68	4,29	2,63	н.п.о.	97,94	8,33	36,30	15,54	1,43	1,09	857	CPX	51,52	0,35	1,28	11,59	0,63	13,98	19,52	0,26	н.п.о.	99,13
MD-10	12	74,22	0,47	13,44	1,96	н.п.о.	н.п.о.	3,14	3,54	1,72	н.п.о.	98,49	14,48	29,95	10,16	1,75	1,00	1093	CPX	51,22	0,38	2,27	11,06	0,53	14,05	20,06	0,32	н.п.о.	99,89
MD-10	13	73,68	0,40	10,57	2,96	0,35	4,52	1,84	2,76	1,26	0,16	98,49	8,03	23,35	7,45	1,79	1,14	969	CPX	50,98	0,38	2,38	11,54	0,53	13,80	19,80	0,30	н.п.о.	99,71
MD-10	14	75,60	0,60	10,96	2,11	н.п.о.	0,25	2,15	3,57	1,98	0,25	97,47	8,03	30,21	11,70	1,37	0,92	810	CPX	50,64	0,40	1,40	11,71	0,58	13,75	19,85	0,28	н.п.о.	98,61
MD-10	15	74,80	0,30	12,47	1,14	н.п.о.	0,20	1,73	3,88	2,61	0,25	97,38	7,48	32,83	15,42	1,35	1,01	848	CPX	50,68	0,47	1,72	11,77	0,61	13,52	19,76	0,26	н.п.о.	98,79
MD-10	16	76,37	0,43	11,99	1,12	н.п.о.	0,37	1,72	3,77	1,72	0,23	97,70	7,43	31,90	10,16	1,49	1,07	870	CPX	50,75	0,48	2,19	10,83	0,66	13,38	20,69	0,28	н.п.о.	99,26
MD-10	17	74,55	0,35	12,60	2,29	0,14	0,53	1,67	3,37	3,09	0,23	98,80	7,24	28,52	18,26	1,42	1,06	-	CPX	52,22	0,20	0,96	22,20	0,80	21,96	1,50	н.п.о.	н.п.о.	99,84
MD-10	18	74,96	0,42	11,88	1,38	н.п.о.	н.п.о.	1,50	4,37	2,05	н.п.о.	96,56	6,34	36,98	12,11	1,26	0,98	808	CPX	50,72	0,42	1,64	10,69	0,50	13,85	20,19	0,26	н.п.о.	98,27
MD-10	19	75,97	0,42	11,37	1,14	н.п.о.	0,68	2,95	2,62	1,71	н.п.о.	96,86	13,54	22,17	10,11	1,85	0,99	-	CPX	51,77	0,20	0,62	22,89	0,93	21,18	1,43	н.п.о.	н.п.о.	99,02
MD-12	20	74,71	0,52	11,73	2,62	н.п.о.	0,32	2,62	2,96	2,89	0,19	98,52	10,18	25,05	17,08	1,47	0,92	-	CPX	51,77	0,20	0,62	22,89	0,93	21,18	1,43	н.п.о.	н.п.о.	99,02

Примечание: АВ, АН, ОРТ - нормативные содержания альбита, анортита и ортоклаза в стеклах расплавных включений. Температуры и давления рассчитаны по (Putirka, 2008).

Табл. 21. Составы сосуществующих Fe- и Fe-Ti оксидов в сростках с пироксеном из базальтов вулкана Меньший Брат (мас. %).

Образец		TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	Сумм		TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	Сумм	T, °C	LogfO ₂	dNNO
МД-3		1,7	9,29	0,14	71,56	1,4	8,75	92,84		14,36	1,92	0,12	72,32	0,33	2,69	91,74	913	-8,73	3,0
МД-3	Mgt	3,17	5,96	0,11	74,01	1,18	7,21	91,64	Ti-Mgt	14,51	1,8	0,12	71,83	0,33	2,65	91,24	1030	-7,34	2,5
МД-3		1,75	7,96	0,12	71,13	1,32	7,7	89,98		14,37	1,67	0,12	71,56	0,34	2,52	90,58	924	-8,58	3,0
МД-3		1,39	8,69	0,11	73,17	1,36	8,51	93,23		14,24	1,82	0,14	72,58	0,33	2,68	91,79	874	-9,28	3,2
МД-3		8,04	4,73	0,12	74,94	0,62	5,11	93,56		13,78	2,05	0,12	72,96	0,3	2,61	91,82	946	-8,12	3,1

Примечание: температура равновесия рассчитана по (Lindsley, Spencer, 1982); фугитивность кислорода - по (Andersen, Lindsley, 1985).

Табл. 22. Содержания воды (мас. %) в стеклах расплавных включений в ортопироксене и кварце из синкальдерных риолитов вулкана Меньший Брат по данным Рамановской спектроскопии

Минерал-Хозяин	Номер включения	S _{gl}	S _{HzO}	H ₂ O(S)	I ₃₅₅₀	I ₄₈₅	H ₂ O(I)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма (безвод.)
Орх	19-1	46803,80	130078,40	-	160,00	370,00	5,05	76,36	0,31	11,23	0,99	-	0,05	1,13	3,93	1,96	95,95
Орх	19-2	12676,39	9998,03	-	6,30	32,50	2,26	77,30	0,26	11,90	0,86	-	0,11	1,27	4,39	0,92	97,01
Орх	19-3 b	4860,05	18181,03	-	27,90	118,00	2,76	76,39	0,26	12,07	0,84	-	0,12	2,03	4,25	1,17	97,14
Орх	19-3-2	2854,55	13033,14	-	17,20	83,01	2,42	75,97	0,18	11,59	1,17	-	0,51	1,96	3,91	2,19	97,48
Орх	19-3-3	7290,27	7544,07	-	15,80	47,50	3,88	76,21	0,32	12,09	0,91	-	0,12	1,54	3,70	2,07	96,96
Орх	19-5	2738,59	23483,05	-	37,60	113,60	3,86	77,29	0,26	11,51	0,89	0,03	0,08	1,37	4,01	1,61	97,06
Орх	19-6 b	4143,80	18259,39	-	18,10	110,00	1,92	78,41	0,27	11,63	0,94	-	0,13	0,99	4,03	2,20	98,60
Qtz	18-1	10845,43	44666,48	3,64	-	-	-	73,39	0,32	11,07	1,40	-	0,14	1,15	5,28	1,98	94,73
Qtz	18-1-1	49762,62	117130,28	2,08	-	-	-	73,47	0,27	11,10	1,43	0,06	0,20	1,22	4,63	1,86	94,24
Qtz	18-2	18824,13	90689,86	4,26	-	-	-	76,50	0,29	11,34	1,46	0,04	0,23	1,32	4,52	2,13	97,83
Qtz	18-3	16544,68	123665,14	6,61	-	-	-	74,17	0,33	12,60	1,53	0,03	0,22	1,28	4,86	2,22	97,24
Qtz	18-4	53002,18	154378,50	2,58	-	-	-	73,85	0,32	12,77	1,60	0,04	0,23	1,69	4,70	2,13	97,32
Qtz	18-5	30727,86	144250,30	4,15	-	-	-	73,12	0,33	11,10	1,63	-	0,22	1,39	5,70	2,02	95,51
Qtz	18-6	13380,56	66277,74	4,38	-	-	-	73,16	0,36	11,08	1,65	0,02	0,24	1,73	5,33	1,94	95,51
Qtz	1-1	6127,65	15030,92	2,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qtz	1-2	6386,96	26811,87	3,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qtz	1-3	9841,48	35815,55	3,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qtz	1-4	26055,02	65041,72	2,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qtz	1-4 2	21018,66	55931,15	2,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qtz	1-5	28192,65	54860,35	1,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qtz	1-7	6302,30	9825,53	1,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qtz	1-8a	18185,50	72202,68	3,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qtz	1-8b	18714,08	64119,87	3,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qtz	1-8c	21355,12	44557,83	1,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание: H₂O(S) - Концентрация воды рассчитанная по площади пиков

H₂O(I) - концентрация воды рассчитанная по интенсивностям пиков