

На правах рукописи



**НИЗАМЕТДИНОВ Ильдар Рафитович**

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

1.6.3 – «Петрология, вулканология»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск - 2022

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

Научный руководитель:

**Кузьмин Дмитрий Владимирович**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории термобарогеохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск.

Официальные оппоненты:

**Плечов Павел Юрьевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, директор Минералогического Музея имени А.Е.Ферсмана РАН, г. Москва.

**Мартынов Юрий Алексеевич**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геохимии Дальневосточного геологического института ДВО РАН, г. Владивосток.

Ведущая организация:

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

Защита состоится **«26» октября 2022 года в 13 час. 00 мин.** на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovetu>

Автореферат разослан «20» сентября 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
24.1.050.01, доктор геолого-минералогических наук.



О.М. Туркина

## Общая характеристика работы

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 км<sup>3</sup>. 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 образованиями кальдер, является предметом 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, где активно проявляется посткальдерный вулканизм. Посткальдерным вулканизмом называют возобновление вулканической активности, происходящее 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.

**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 в пределах современных островных дуг являются актуальной проблемой.

Изучение состава и P-T параметров эволюции исходных мантийных и коровых магм позволяют оценить их роль в формировании крупных кальдер в надсубдукционных обстановках. 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 них 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 породообразующих минералов и пород, 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 сотрудниками ИГМ СО РАН. 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 двусторонне полированных пластинок. Для определения состава минералов вкрапленников и исследования расплавных включений в минералах 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 в НГУ, Новосибирск выполнено 32 анализа минералов и стекол первичных расплавных включений (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  $\text{NNO}+3$  лог. ед. Эти расплавы соответствуют низкокальцевым 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 мантийно-коровых процессов, протекающих в пределах южной части Курильской островной дуги, их связи с вулканизмом, кальдеро- и рудообразованием.

#### **Апробация работы и публикации**

Результаты работы представлены в 15 публикациях. Среди них 4 статьи в рецензируемых изданиях, 3 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, а также 11 тезисов докладов на отечественных и международных конференциях.

#### **Структура и объем работы.**

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

**Благодарности.** Автор выражает глубокую 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: Шоханова 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 выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 (соглашение 075-15-2020-802).

## **Содержание работы**

**В первой главе «Посткальдерный вулканизм в современных вулканических поясах»** приводится обзор современных представлений о роли базитовых магм в 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 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); 2 - крупные очаги кислых магм могут образовываться при плавлении коровых пород под воздействием тепла более горячих мафических магм (Beard, Lofgren, 1991; Tamura, Tatsumi, 2002; Dufek, Bergantz, 2005); 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). 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). О значимой роли базитовых магм в формировании кальдер свидетельствует и 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.

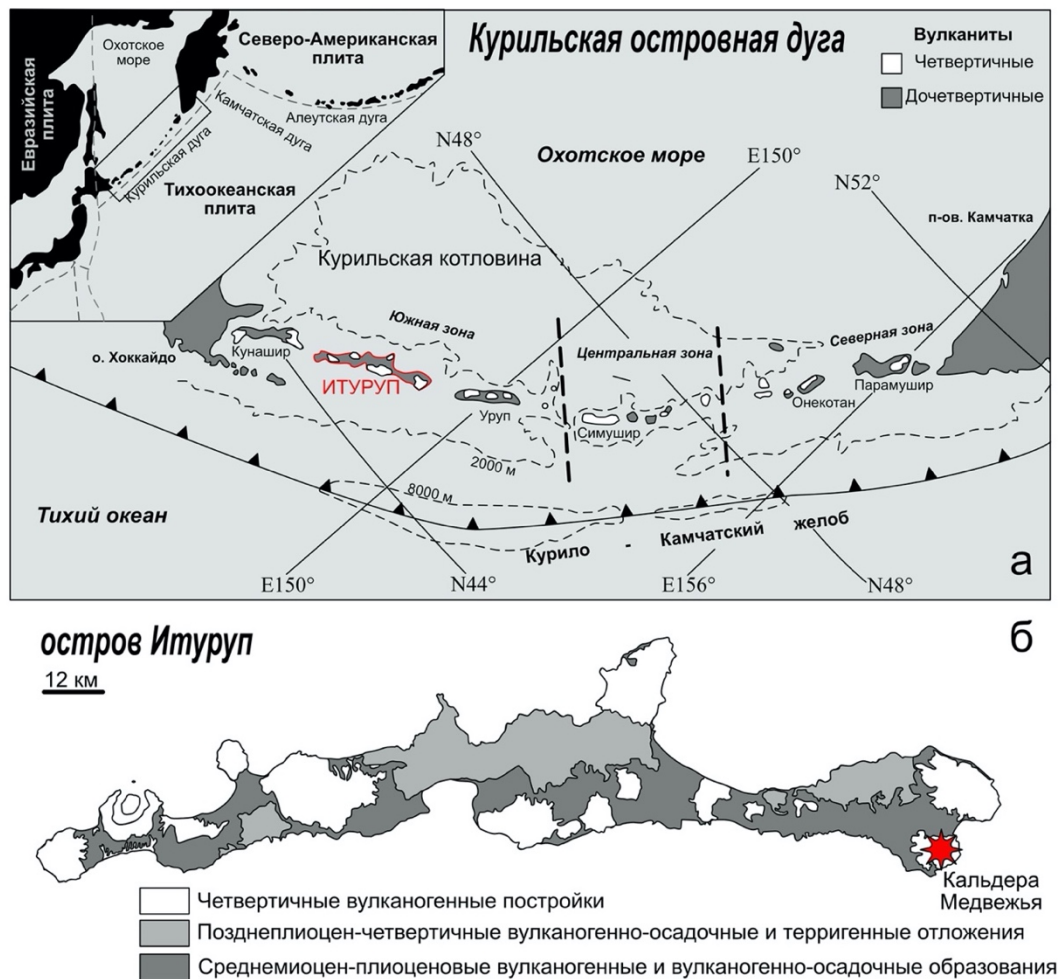
Преыдушие исследования кальдеры Медвежья были посвящены описанию геологии, последовательности вулканических событий, выяснению происхождения основных магм и определению их источников (Коваленко и др. 2004, Толстых и др. 1997, Чибисова и др. 2009, Рыбин и др., 2018, Martynov et al., 2022). Однако породы кислого состава, достаточно широко представленные в продуктах вулканической деятельности кальдеры, в большинстве своем оставались за рамками исследований. В этом отношении 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 тефрой базальтового и андезибазальтового состава. С ними связаны лавовые потоки, спускающиеся на запад и юг от вулканической постройки и также имеющие базальтовый и андезибазальтовый состав с содержаниями MgO до 10 мас. %. 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) говорит о том, что в процессе эволюции вулканического очага происходило взаимодействие мантийных магм с породами коры острова Итуруп.

**Во второй главе «Геологическое строение кальдеры Медвежья и вулкана Меньший Брат»** приводится описание истории формирования и геологического строения кальдеры Медвежья. Кальдера Медвежья, расположенная на северо-востоке о. Итуруп (Рис. 1) 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, Сиреневый, Медвежий, а также вулкан Меньший Брат. 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).

**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  $\sim 60$  км<sup>3</sup>.

**Кальдерообразующая стадия** характеризуется серией мощных 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 встречаются в южной ее части, а также в единичных обнажениях в центре депрессии. Оценки объемов извергнутого кислого материала сильно разнятся – от 12 м<sup>3</sup> (Ермаков, Штейнберг, 1999) до 20-25 м<sup>3</sup> (Мелекесцев и др., 1974).



**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)).

На посткальдерной стадии были образованы лавовые потоки и шлаковые конуса вулканов Медвежий, Сиреневый, 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 игнимбриты, составляет  $0,17 \pm 0,08$  млн. лет (Ермаков, Штейнберг, 1999).

Посткальдерный вулканизм характеризуется излияниями оливин-пироксен-плагиоклазовых, пироксен-плагиоклазовых базальтов, андезибазальтов и андезитов. По своим петрохимическим характеристикам они относятся к известково-щелочной низкокальциевой серии (Рыбин и др., 2018, Martynov et al., 2022), а по данным В.И. Коваленко — это породы толеитовой серии (Коваленко и др., 2004).

Вулкан Меньший Брат 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 вмещающих породах преобладает плагиоклаз, также присутствуют пироксены и кварц (Ермаков, Штейнберг, 1999).

В вершину купола врезаны три кратера – северо-западный, именуемый Коротышка, юго-восточный – Восток, и Вершинный, находящийся между ними, из которых происходили выбросы шлаков основных пород, 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 магнезиальными порфировыми базальтами и андезибазальтами, являются главными объектами данного исследования.

**В третьей главе «Материалы и методы исследования»** изложены методы и методические подходы, использованные при выполнении этой работы. Определение главных петрогенных элементов в породах проводилось методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) с использованием спектрометра ARL-9900-XP (ARL). Содержания элементов примесей в составе пород определялись методом ICP MS на масс-спектрометре Element-2 (Finnigan Mat) с двойной фокусировкой.

Определение главных компонентов в составе минералов вмещающих пород, а также включений в них проведено методом ЭДС рентгеноспектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Ltd) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Ltd) и LEO-1430VP (Leo Electron Microscopy Ltd) с системой микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments Ltd).

Содержание элементов-примесей в составе минералов-вмещающих пород, а также в составе включений определялось методом ВДС рентгеноспектрального микроанализа на микроанализаторе JXA-8100 (Jeol). Помимо этого, определение содержания элементов примесей в минералах-вмещающих породах проведено методом LA ICP MS на масс-спектрометре XSERIES II (ThermoFisher scientific) с приставкой лазерной абляции NewWave Research UP-213.

Определение содержания летучих компонентов, а также редких элементов в составе стекол расплавных включений проводилось методом вторично ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на одноканальном ионном зонде CAMECA IMS-4F.

Термометрические эксперименты по прогреву и закалке расплавных включений во вмещающих породах проводились на термокамере конструкции Томиленко-Осоргина и на высокотемпературной трубчатой печи Nabertherm.

Определение состава флюидных включений и газовых обособлений в расплавных включениях, а также содержания воды в стеклах расплавных включений проводилось методом Рамановской спектроскопии на спектрометре Horiba Lab Ram HR800.

Измерение содержания углеводородов в составе газовой фазы включений минералообразующих сред во вмещающих породах выполнялось методом беспиролизной газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на газовом хромато-масс-спектрометре Focus GC/DSQ II MS (Thermo Scientific, USA).



## Обоснование защищаемых положений

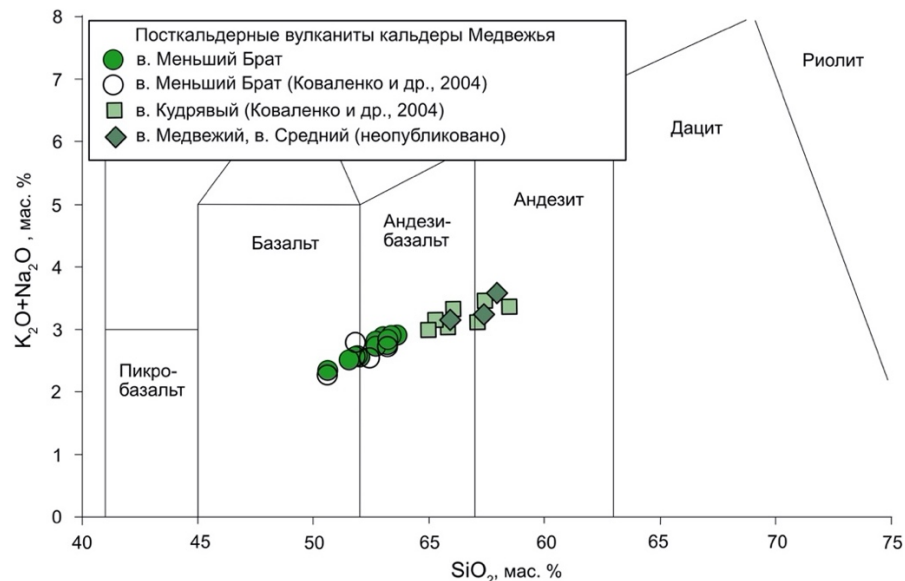
**Первое защищаемое положение.** Ликвидусная ассоциация базальтов вулкана *Меньший Брат* представлена оливином ( $Fo_{85-90}$ ) и хромистой шпинелью ( $Cr\# 0,46-0,60$ ). Её кристаллизация протекала при температуре 1090-1220 °С, фугитивности кислорода на уровне кислородного буфера  $NNO+0,3$  лог. ед.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

Материалы для обоснования первого защищаемого положения представлены в главе 4 «*Основные породы вулкана Меньший Брат и их источники*» (раздел «*Ликвидусная ассоциация базальтов*»).

Образцы, слагающие лавовые потоки кратеров *Коротышка* и *Восток* сильно похожи по минеральному составу и структурно текстурным особенностям. Они представляют собой темно-серые порфиновые базальты, с массивной, реже, пористой текстурой. Порфиновые вкрапленники представлены в большинстве случаев фенокристами плагиоклаза, клинопироксена, ортопироксена и оливина. Многочисленные гломеропорфиновые сростки представлены срастаниями фенокристов пироксенов и плагиоклаза, оливин не образует сростков с другими минералами, редко наблюдаются оливиновые мономинеральные сростки. Микроскопически фенокристы и гломеропорфиновые 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.

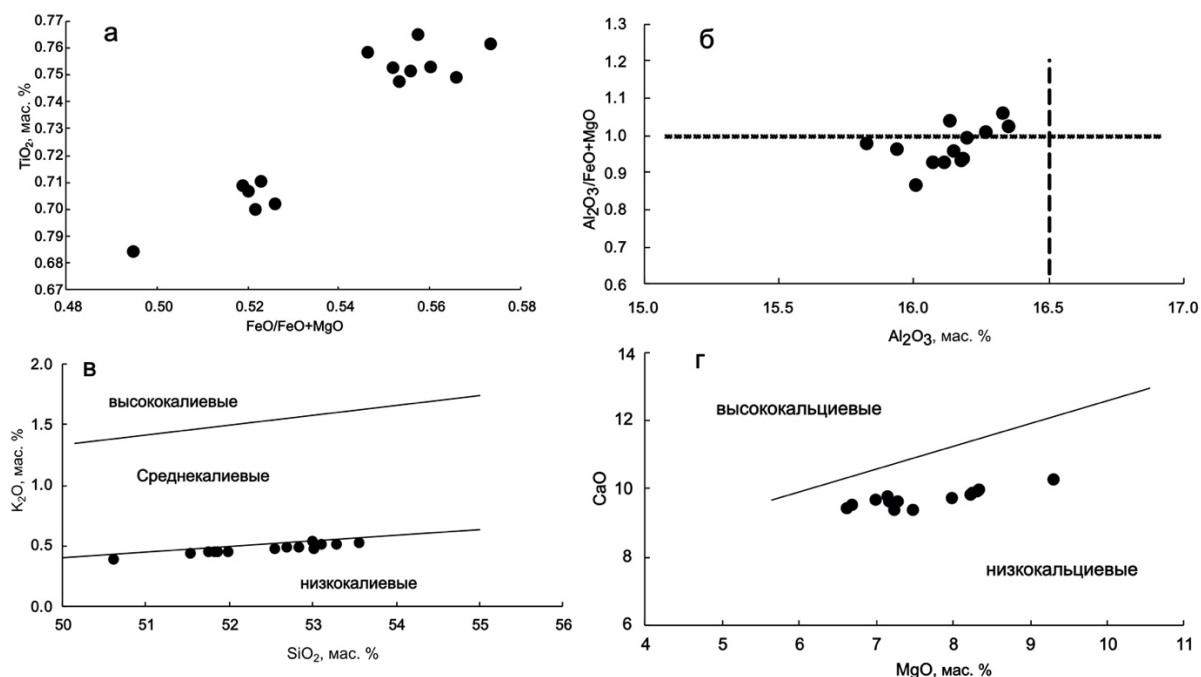
Изученные породы по содержанию кремнезема и суммы щелочей образуют единый ряд от базальтов к андезибазальтам (Рис. 2), а по своим петрохимическим особенностям являются низкокалиевыми, низкокальциевыми, известково-щелочными породами (Рис. 3).

На основании взаимоотношения минералов-вкрапленников, отсутствию включений оливина в плагиоклазе, пироксенах, и отсутствию пироксенов и плагиоклаза в виде включений в оливине, а также сростков оливина с другими минералами-вкрапленниками сделано заключение, что ликвидусная ассоциация в базальтах вулкана *Меньший Брат* представлена оливином и шпинелью. Об этом же говорят высокая магнезиальность оливинов ( $Fo$  до 90,1 мол. %) и хромистый состав шпинели в нем.



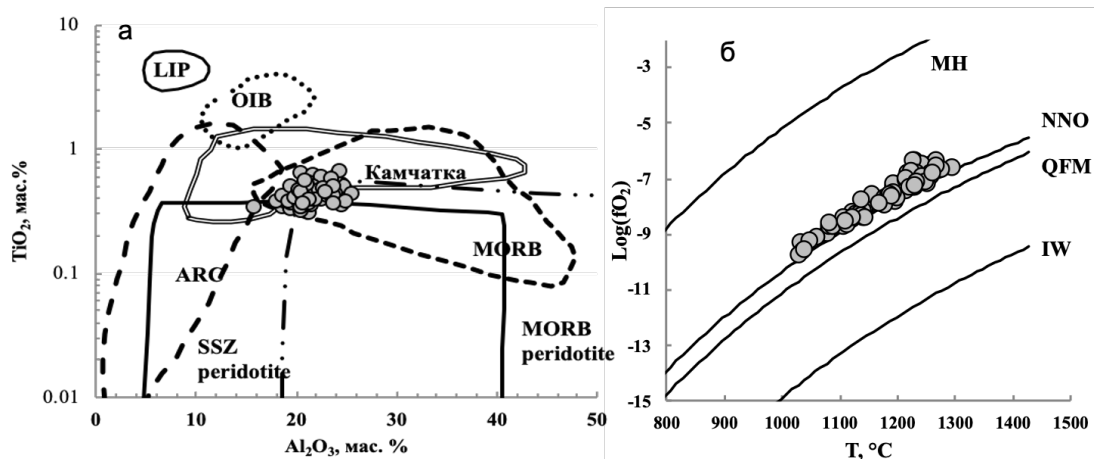
**Рис. 2.** TAS-диаграмма с валовыми составами лав вулкана *Меньший Брат* и других вулканов кальдеры *Медвежья*.

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. Шпинель представлена идиоморфными, хорошо ограненными кристаллами октаэдрического габитуса коричневого цвета, включенными в оливин, и в некоторых случаях присутствует как ксеногенная фаза в расплавных включениях в оливине. Она демонстрирует 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. Используя составы сосуществующих оливина и шпинели (Рис. 4а) определена фугитивность кислорода для равновесия оливин-шпинель по модели (Ballhaus et al., 1991). Она находится в диапазоне  $NNO-0.9$  -  $NNO+1$  при температурах 1030 – 1300°C и, в среднем, соответствует буферу  $NNO+0,3$  лог. ед. (Рис. 4б).

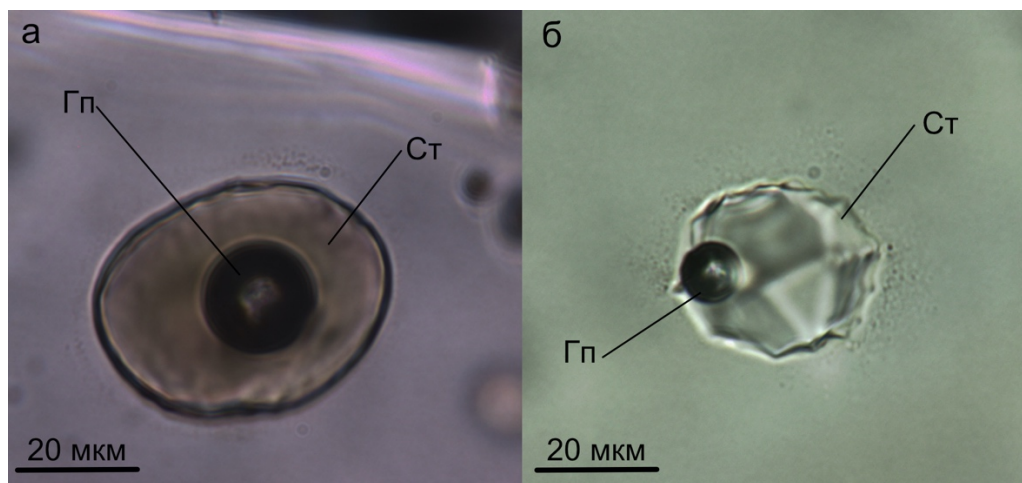


**Рис. 3. Петрохимические особенности посткальдерных лавовых потоков вулкана Меньший Брат:** б – глиноземистость (Кипо, 1960); в – калиевость пород (Петрографический кодекс, 2009); г – кальциевость по (Macdonald et al., 2000).

Помимо шпинели, в оливине обнаружены первичные расплавные включения. Они встречаются в виде одиночных включений либо в виде азональных групп (Рис. 5). Обычно РВ в оливине имеют округлую, вытянутую форму. Размер включений в среднем не превышает 30 мкм. Встречаются как частично-раскристаллизованные, так и природно-закаленные стекловатые включения. Высокотемпературные эксперименты по прогреву и закалке РВ показали, что достичь полной гомогенизации включений не удастся при температурах выше 1340°C. Последняя кристаллическая фаза плавится при температуре 1270°C. Это может быть связано с потерей воды РВ как в процессе извержения (Portnyagin et al., 2008; Chen et al., 2011; Gaetani et al., 2012; Bucholz et al., 2013), так и в эксперименте (Mironov et al., 2015; Kamenetsky et al., 2017). В связи с этим температуры кристаллизации оливина были оценены по равновесию минерал-расплав (Ford et al., 1983) и по минеральному термометру (Coogan et al., 2014) и составили 1245-1305°C и 1090-1220°C соответственно.



**Рис. 4.** Состав включений шпинели в оливине (а) и фугитивность кислорода базальтового расплава (б), 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. 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* – вулканы островных дуг; *SSZ peridotites* – надсубдукционные перидотиты; *MORB peridotites* – перидотиты *COX*. Поле составов шпинелей Камчатки по (*Nekrylov et al., 2019*).



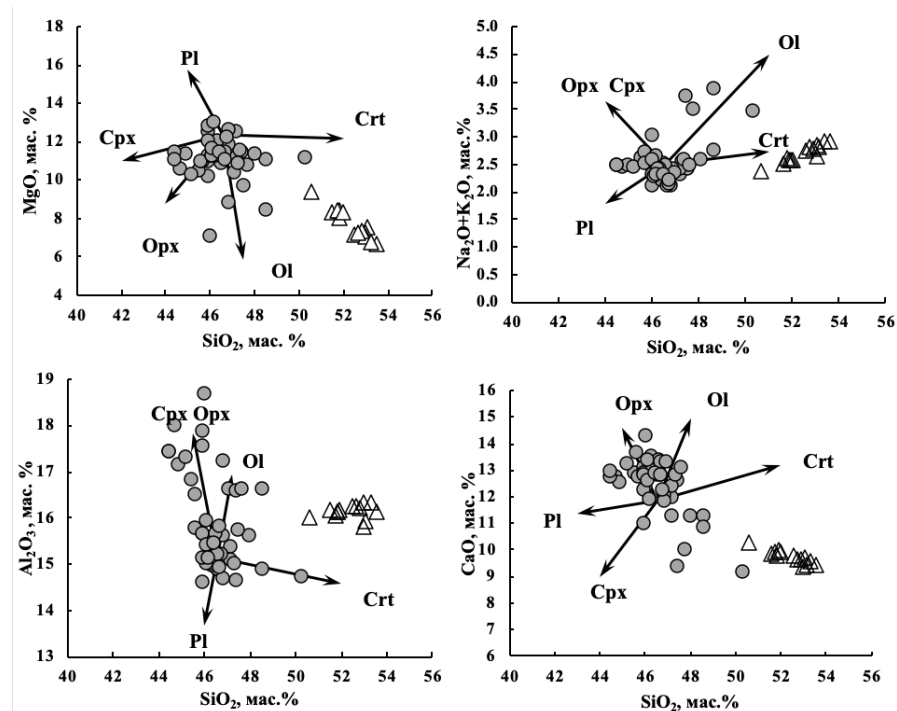
**Рис. 5.** Первичные стекловатые расплавные включения во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана *Меньший Брат*.

В работе использовались только стекловатые первичные природно- или экспериментально- закаленные расплавные включения. 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 (Табл. 1)). Включения характеризуются повышенными содержаниями  $CaO$ ,  $MgO$  и близкими значениями  $-K_2O + Na_2O$  (Рис. 6).

По данным ВИМС, содержания  $H_2O$  в стёклах природно-закалённых РВ в оливине достигают 1,5 мас. %, 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 магнетиальности оливина с использованием подходов из (*Almeev et al., 2007; Sobolev et al., 2016*). 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 по (Coogan et al., 2014). «Реальные» температуры (1090-1220°C) гораздо ниже «сухих» (1245-1305°C) по причине присутствия значительного количества воды в расплаве при кристаллизации минералов. Результаты этих оценок показывают, что содержание воды в расплаве падало по мере кристаллизации расплава от 5 мас. % в равновесии с оливином Fo<sub>89,5</sub> до практически полного её отсутствия в равновесии с Fo<sub>86,5</sub> (Низаметдинов и др., 2018).

Состав первичного расплава, из которого кристаллизовалась ликвидусная ассоциация (оливин и шпинель) был определен на основе состава экспериментально- и природно-закаленных стекол первичных ПВ, захваченных оливином. Составы захваченных расплавов после коррекции на Fe-Mg постзахватное переуравновешивание (Danyushevsky et al., 2000) были пересчитаны до равновесия с наиболее магнезиальным оливином, встреченным в изученных базальтах - с Fo<sub>90,4</sub> в программе Petrolog III (Данюшевский, Плечов, 2011).



**Рис. 6.** 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, Crт - хромит, Pl - плагиоклаз, Ol – оливин.

**Таблица 1.** Средние реконструированные захваченные и первичные расплавы базальтов вулкана Меньший Брат.

Поток	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма
Захваченные составы расплавных включений после реконструкции Fe-Mg обмена и кристаллизации оливина на стенках включения												
Коротышка	46,49	0,73	16,24	1,57	9,04	0,13	11,00	12,07	2,29	0,36	0,09	100,00
Восток	46,53	0,78	15,53	1,59	9,02	0,08	11,23	12,84	2,07	0,26	0,08	100,01
Реконструированные первичные расплавы в равновесии с оливином Fo <sub>90</sub>												
Коротышка	46,11	0,68	15,26	2,00	8,66	0,12	13,24	11,35	2,15	0,34	0,09	100,00
Восток	46,18	0,74	14,66	2,01	8,67	0,08	13,25	12,13	1,96	0,24	0,07	100,01

Содержание редких и редкоземельных элементов так же было скорректировано на добавление оливина в расплав. Расплавы, равновесные с ликвидусным оливином, имеют

пикробазальтовый состав (Табл. 1), характеризующийся содержаниями  $\text{SiO}_2$  44,3-48,0 мас. %, и  $\text{MgO}$  достигающий 13,8 мас. % и относится к низко-умеренно калиевой низкоглиноземистой серии с повышенным для Курило-Камчатского региона содержанием магния.

Поведение летучих компонентов в расплаве характеризуется их постепенным накоплением по мере кристаллизации. Содержания фтора увеличиваются с 0,008 до 0,027 мас. %, хлора – с 0,08 до 0,28 мас. %. Содержания серы варьируют 0,11 до 0,21 мас. %, а фосфора от 0,01 до 0,11 мас. %. При этом концентрации S и P значительно не изменяются по мере кристаллизации расплава.

На основании подходов изложенных в (Plank et al., 2007; Herrmann, Spandler, 2008) и полученных данных по содержанию Se, K,  $\text{H}_2\text{O}$  в исходных расплавах базальтов вулкана Меньший Брат), была проведена оценка температуры образования флюида, отделяющегося от субдуцирующей плиты, который способствовал плавлению мантийного клина при образовании исходных расплавов.

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 °С при давлении 35 – 40 кбар. Опираясь на геохимические параметры расплавов (отношение  $\text{K}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ ), 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°С, что хорошо согласуется с представленными выше сейсмическими данными и результатами моделирования. Оценка температуры, проведенная на основании уравнения для отношения  $\text{H}_2\text{O}/\text{Se}$  предложенного в работе (Plank et al., 2009), показывает, что температура дегидратации пород слэба составляла 726-776°С, что, в среднем, заметно выше оценок на основании отношения  $\text{K}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ .

Вариации отношений некоторых несовместимых элементов, таких как  $\text{La}/\text{Yb}$  и  $\text{Nb}/\text{Y}$ , в первичных расплавах, показывающие хорошую зависимость от глубины погружающейся плиты (Рис. 7) позволяют провести оценку глубины слэба и под о. Итуруп.  $\text{La}/\text{Yb}=1.0-1.2$  и  $\text{Nb}/\text{Y}=0.027-0.033$  показывают на 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).

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). Измеренные содержания Ni и Mn в наиболее магнезиальных оливинах показывают, что основным источником вещества при образовании первичных расплавов выступал перидотит с небольшой примесью безоливинового компонента, в качестве которого могли выступать как пироксениты мантийного клина, так и пироксениты нижней части островодужной коры (Рис. а) (Jull, Kelemen, 2001; Некрылов и др., 2018).

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). Степень плавления мантийного источника была оценена несколькими различными методами:

**а)** на основании состава хромистой шпинели по модели (Hellebrand et al., 2001) составляет 17-18 мас. %;

**б)** на основании содержания Ti в шпинели по методу (Nekrylov et al., 2018) степень плавления составила 17-25 мас. %;

в) геохимический метод оценки степени плавления, предложенный в работе (Portnyagin et al., 2007), показывает степени плавления 4-6 мас. % после предварительного плавления с удалением расплава в 2-6 мас. %, где в качестве мантийного источника взята E-DMM.

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. 8б).

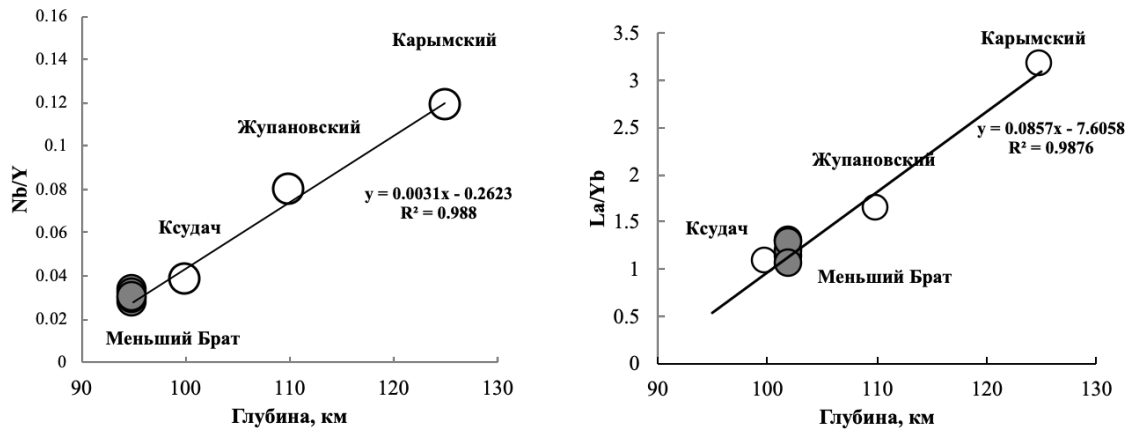


Рис. 7. Отношения некоторых несовместимых элементов в расплавных включениях из оливинов базальтов вулкана Меньший Брат и некоторых фронтальных вулканов Камчатки (Плечова и др., 2011) против глубины субдуцирующей плиты. Средние значения для вулкана Ксудач и Карымский (Portnyagin et al., 2007), для вулкана Жупановский (Плечова и др., 2011). Значение глубины субдуцируемой плиты для в. Меньший Брат рассчитано на основании регрессии, полученной по данным из работы (Плечова и др., 2011).

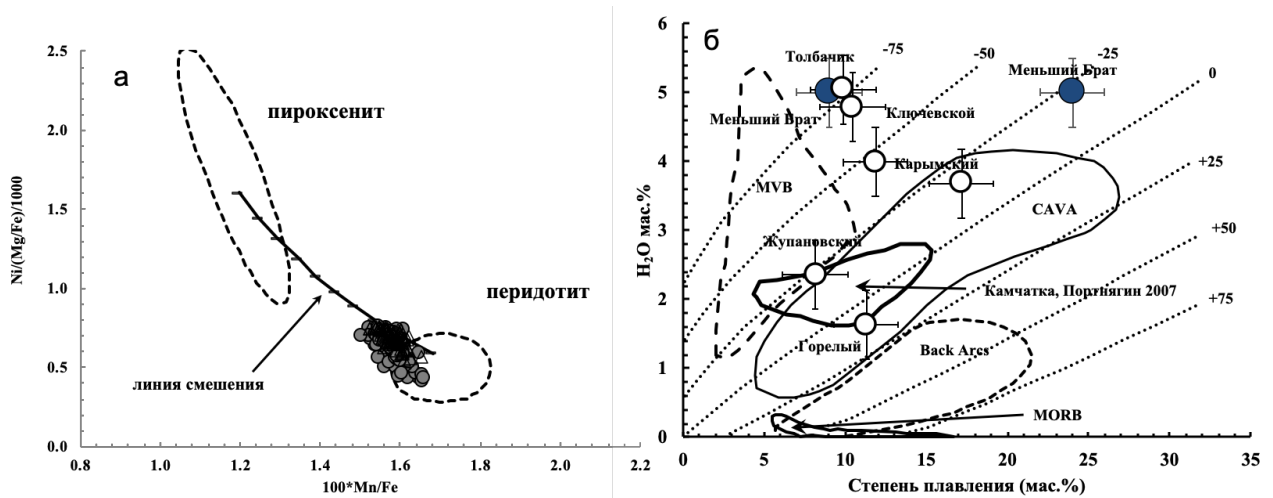


Рис. 8. Состав источника и линия смешения компонентов, участвовавших в образовании исходных расплавов, из которых кристаллизовались базальты вулкана Меньший Брат на основании содержания Ni и Mn в наиболее магнезиальных ликвидусных оливинах по (Sobolev et al, 2007) (а) и параметры мантийного плавления (б) 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. Кружки – оливины кратера Восток, треугольники – оливины кратера Коротышка. Точечным пунктиром показано отклонение температуры плавления от солидуса сухого перидотита.

**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  $NNO+3 \log. \text{ед.}$  Эти расплавы соответствуют низкокальцевым дацитам.

Материалы, обосновывающие второе защищаемое положение изложены в главе 4 «**Основные породы вулкана Меньший Брат и их источники**» («**Поздняя ассоциация вкрапленников основных пород**»).

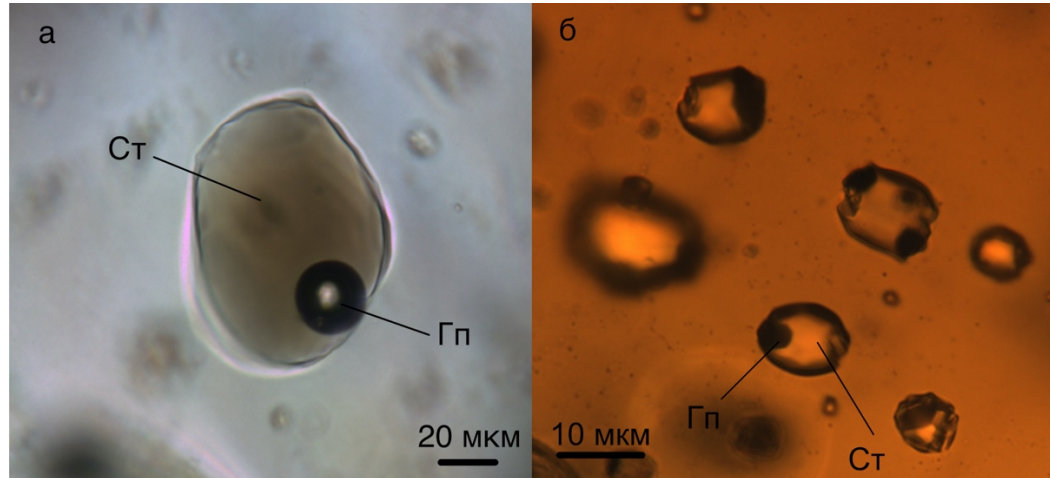
Поздняя ассоциация вкрапленников вулкана Меньший Брат представлена вкрапленниками и сростками плагиоклаза и пироксенов. Состав плагиоклаза варьирует по содержанию анортитового минала от битовнита к анортиту (An 77 - 95 мол. %). При этом он обладает сложной ритмичной зональностью по содержанию анортитового компонента. Fe-Mg пироксен представлен энстатитом (гиперстеном с содержанием En 60-62 мол. %) и с содержанием волластонитового минала 3-4 мол. %. Он образует идиоморфные вкрапленники размером до 2 мм коричневого цвета и содержит большое количество включений апатита, магнетита, в меньшей степени плагиоклаз. Ca-Mg пироксен представлен высококальцевым авгитом (Woll 33-40 мол. % с #Mg 0,53-0,60). Эти минералы содержат включения друг друга, которые по составу не отличаются от вкрапленников.

Первичные природно-закаленные расплавные включения были обнаружены во вкрапленниках плагиоклаза (Рис. 9а) и энстатита (Рис. 9б). РВ в плагиоклазе как правило располагаются группами, приуроченными к зонам роста вкрапленников. В энстатите встречены как одиночные РВ, так и зональные и азональные группы РВ.

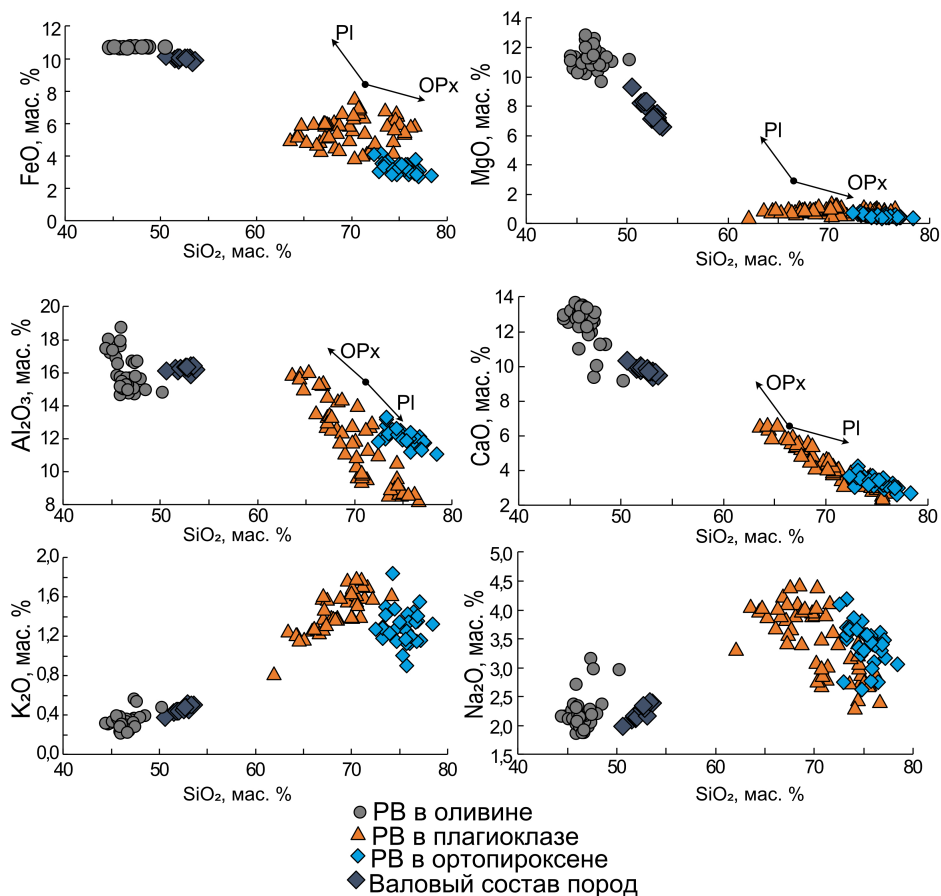
В работе использовались только стекловатые природно-закаленные первичные расплавные включения. Составы стекол расплавных включений в плагиоклазе на TAS диаграмме попадают в поле дацитов (67-75 мас. %  $SiO_2$  и до 6 мас. %  $K_2O+Na_2O$ ) (Рис. 10). Они гораздо более кислые по сравнению с составом стекол расплавных включений в оливине и составом базальтов. Содержания магния в них не превышают 2 мас. %, а железа - 8 мас. %. Содержания  $K_2O$  и  $Na_2O$  наоборот значительно выше – от 1 до 2 мас. % и от 2,5 до 4,5 мас. % соответственно. Состав стекол расплавных включений в энстатите попадает в поля дацитов и риолитов (72-78 мас. %  $SiO_2$  и до 6 мас. %  $K_2O+Na_2O$ ). Это наиболее кислые включения по сравнению с остальными минералами-вкрапленниками. Содержания магния в них не превышают 2 мас. %, а железа - 4 мас. %.

С целью определения температур кристаллизации вкрапленников плагиоклаза проводились высокотемпературные эксперименты по прогреву РВ. 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 в 10 часов и более. Температура гомогенизации расплавных включений в плагиоклазе составляет 1190-1230 °С. Высокие температуры, полученные в результате термометрии РВ, могут быть обусловлены высокой вязкостью кислых расплавов. Для проверки данных термометрии был проведен расчет температур равновесия плагиоклаз-расплав. Расчетные температуры кристаллизации вкрапленников плагиоклаза на основании модели (Putirka, 2008) составляют 895 - 1190 °С.

Состав включений в плагиоклазе и пироксене гораздо более кислый, чем состав пород и расплавных включений в оливине (Рис. 10). Промежуточных расплавов по составу между ними (андезитового, андезибазальтового) не обнаружено, хотя состав вкрапленников, которые содержат кислые включения, является типичным для базальтов. Кислый состав стекол включений не может быть обусловлен кристаллизационной дифференциацией базальтового расплава, из которого кристаллизовался оливин. Сильное различие состава включений во вкрапленниках базальтов вулкана Меньший Брат может быть связано со смешением контрастных по составу магм.



**Рис. 9. Расплавные включения во вкрапленниках плагиоклаза (а) и ортопироксена (б) из базальтов вулкана Меньший Брат.**



**Рис. 10. Состав стекол расплавных включений во вкрапленниках базальтов вулкана Меньший Брат на дискриминационных диаграммах Харкера. Стрелки отражают тренды кристаллизации минерала-хозяина на стенки включения.**

Образование кислого расплава в ходе процессов дифференциации исходно базальтового расплава подтвердить достаточно трудно (Bachmann, Bergantz, 2006; Gelman et al., 2013). Для того, чтобы расплав накапливал  $\text{SiO}_2$  нужно кристаллизовать оксиды и силикаты с содержанием  $\text{SiO}_2$  менее 50 мас. %. Такими минералами могут быть оливин (порядка 40 мас. %  $\text{SiO}_2$ ) и оксиды (магнетит, шпинель, титаномagnetит). 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, необходима высокая активность кислорода, которая достигается при фугитивности кислорода гораздо более высокой, чем та, которая соответствует 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 SiO<sub>2</sub> составляет 67 мас. %.

Таким образом эволюция исходно мантийного базальтового расплава после образования ликвидусного парагенезиса заключалась в домешивании фенокристаллов, которые кристаллизовались в кислом расплаве. Эти расплавы имели более высокий окислительный потенциал, который соответствует кислородному буферу NNO+3, оцененный по составу Fe-Ti оксидов 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 очень велико, что выражается в большом количестве вкрапленников (до 70 отн. %), которые фактически являются ксеногенными для базальтовых потоков вулкана Меньший Брат. При этом валовый состав пород изменился незначительно, так как эти вкрапленники имеют типично базальтовый состав: основной плагиоклаз и магнезиальные пироксены, а вклад кислого расплава в составе базальтов не превышает 17 отн. % в составе базальтов (Рис. 11).

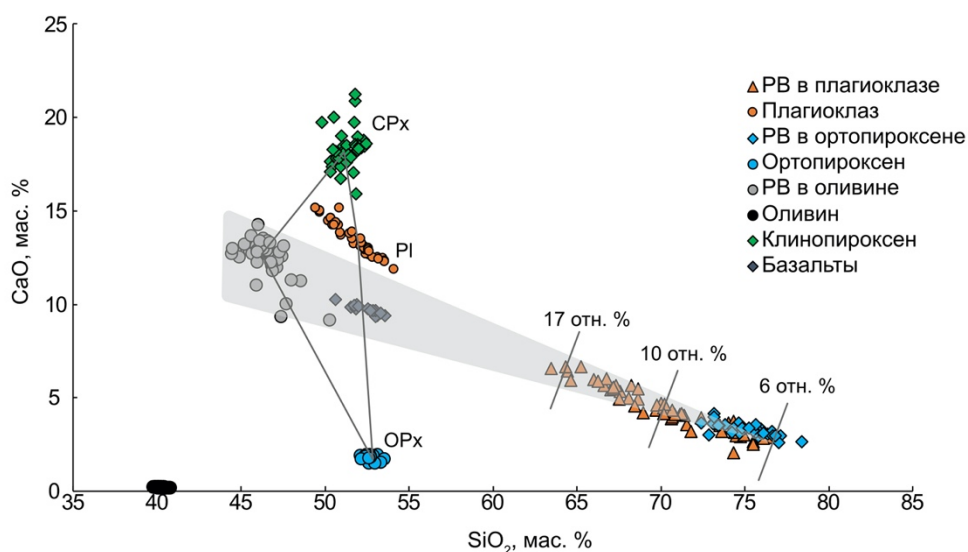
*Третье защищаемое положение. Всё разнообразие пород вулкана Меньший Брат образовано при взаимодействии базитовой магмы, образовавшейся при плавлении мантийного клина, и кислой магмы, образовавшейся при плавлении островодужной коры.*

Материалы, обосновывающие третье защищаемое положение изложены в **главе 5 «Синкальдерные породы»**.

Для выяснения происхождения ассоциации минералов, кристаллизовавшейся из кислого расплава, необходимо рассмотреть кислые породы синкальдерного этапа формирования вулкана Меньший Брат. Это риолитовые пемзы, слагающие пемзово-игнимбритовую толщу и андезиты купола вулкана. Андезиты купола 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 этих пород. 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.

Структура андезитов купола порфировая, гломеропорфировая. Минералы-вкрапленники – плагиоклаз (~65-75%), клинопироксен и ортопироксен (~20-25% и ~10-15% соответственно). Синкальдерные риолиты представлены светло-серыми пемзами со стекловатой основной массой. По своему строению они представляют собой вспененное кислое стекло, в котором находятся вкрапленники плагиоклаза, клино- и орто- пироксена и кварца. Соотношение вкрапленников и основной массы ~25:75. Структура риолитов порфировая, гломеропорфировая.

Породы, слагающие купол вулкана, по составу относятся к отряду средних вулканических горных пород (60,5-62,8 мас. % SiO<sub>2</sub>), к подотряду нормально-щелочных (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 4,1-4,4 мас. %) пород (Петрографический кодекс, 2009). Породы, слагающие пемзово-игнимбритовую толщу, относятся к отряду кислых (74,5 мас. % SiO<sub>2</sub>), к подотряду низко-щелочных (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 5,4 мас. %).

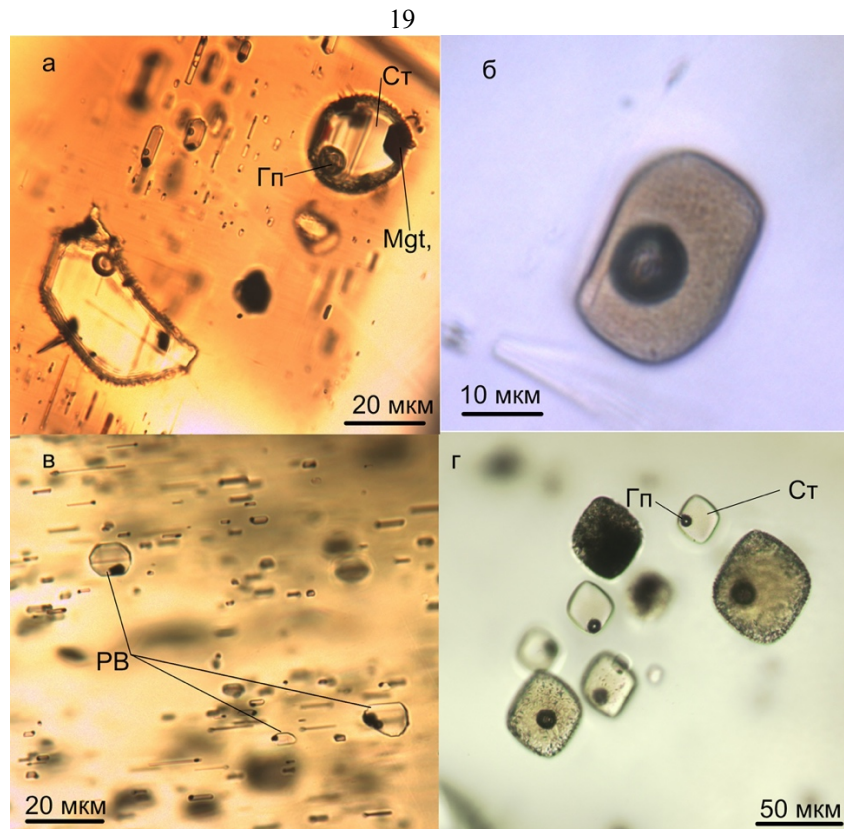


**Рис. 11.** Содержания CaO в посткальдерных базальтах, минералах-вкрапленниках и расплавах, участвовавших в образовании базальтов вулкана Меньший Брат. Серой линией показан тренд смешения и количественный вклад кислого расплава в содержание кальция в валовом составе базальтов.

Плагиоклаз – наиболее распространенный минерал данных пород, слагает идиоморфные прямоугольные кристаллы светло-серого цвета. Состав плагиоклаза по содержанию анортитового минала соответствует битовниту (содержание An 72-79 мол. %). В риолитовых пемзах Fe-Mg пироксен представлен энстатитом (гиперстеном с содержанием En 59-61 мол. %) с содержанием волластонитового минала 2,7-3,5 мол. %. 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. %). По химическому составу клинопироксен из риолитов отвечает высококальциевому авгиту (Woll 40-42 мол. %) с #Mg 0,68-0,72. Вкрапленники клинопироксена из андезитов купола значительно не отличаются по составу от них (Woll 40-42 мол. % и #Mg 0,63-0,73). Вкрапленники кварца встречены только в составе риолитов. Они образуют хорошо ограненные кристаллы размером до 1,5 мм.

Практически все минералы-вкрапленники пород купола и синкальдерных пемз содержат включения минералообразующих сред (Рис. 12, 13). В основном это первичные природно-закаленные стекловатые РВ и твердофазные минеральные включения. Для выявления и характеристики исходных магм были использованы результаты исследования первичных расплавных включений в минералах-вкрапленниках.

Составы стекол РВ во вкрапленниках плагиоклаза из риолитовых пемз (Рис. 14) относительно более кислые в сравнении с составом стекол РВ в плагиоклазе из андезитов и в сравнении с составом этих пемз (78-80 мас. % SiO<sub>2</sub> и 5,9-6,5 мас. % Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O). Состав стекол РВ в плагиоклазе в андезитах гораздо более кислый, чем сами породы и попадают в поле риолитов на TAS-диаграмме с более широкими вариациями по сумме оксидов щелочных элементов (74-80 мас. % SiO<sub>2</sub> и 4,2-6,9 мас. % Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O).

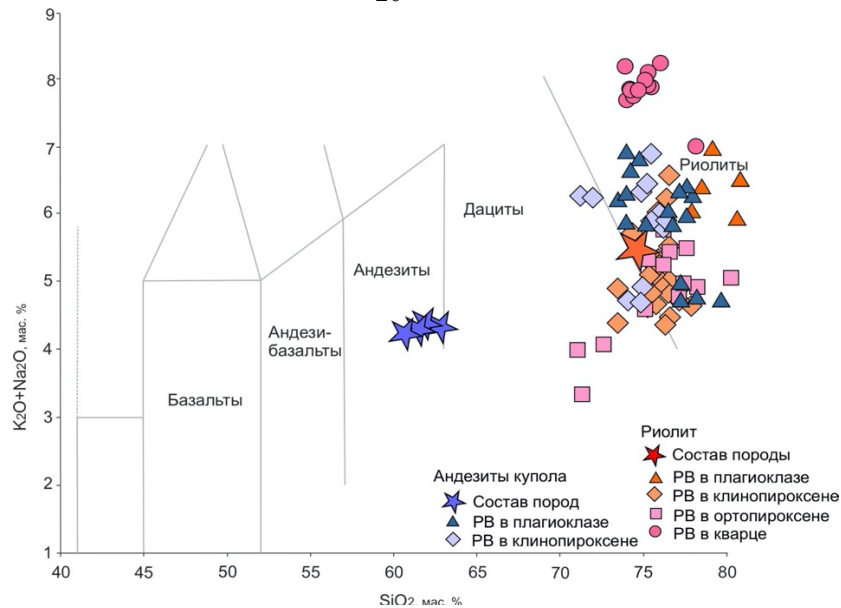


**Рис. 12.** Расплавные включения во вкрапленниках риолитовых пемз вулкана *Меньший Брат*: а - азонально расположенные первичные расплавные включения во вкрапленниках ортопироксена; б – первичное расплавное включение в плагиоклазе; в – группа расплавных включений в клинопироксене; г – группа расплавных включений в кварце.



**Рис. 13.** Первичные расплавные включения во вкрапленниках плагиоклаза (а) и клинопироксена (б) из андезитов купола вулкана *Меньший Брат*.

Состав стекол расплавных включений в пироксенах располагается в поле риолитов с небольшим разбросом в поле дацитов на TAS-диаграмме (Рис. 14). Включения в авгите из андезитов аналогичны включениям в авгите из риолитов (68-76 мас. %  $\text{SiO}_2$  и 3,5-6,9 мас. %  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ). Составы PB в энстатите из андезитов расположены с большим разбросом (71-80 мас. %  $\text{SiO}_2$  и 3,3-5,5 мас. %  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ). Точки составов стекол PB в кварце образуют компактную группу в поле риолитов (74-78 мас. %  $\text{SiO}_2$  и 6,4-8,2 мас. %  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ).



**Рис. 14. TAS-диаграмма синкальдерных пород и стекол расплавных включений во вкрапленниках риолитов и андезитов в. Меньший Брат.**

Температуры кристаллизации плагиоклаза на основе модели минерал-расплав (Putirka, 2008) показывает значения 810-1020°C в андезитах купола и 870-920°C в риолитах. Оцененные температуры кристаллизации ортопироксена составляют 1100-900°C, а клинопироксена – 880-790°C в риолитах и 1090-810°C в андезитах.

Составы расплавных включений во вкрапленниках кислых пород указывают, что все минералы вкрапленники кристаллизовались в кислом расплаве. Этот расплав по составу соответствует дацит-риолиту. Так как образование настолько кислого расплава невозможно объяснить процессами дифференциации и фракционной кристаллизации исходно базальтового расплава, то для этого предлагается механизм частичного плавления коровых островодужных субстратов.

Экспериментальные данные по плавлению метабазитов (Beard, Lofgren, 1991) показывают, что при дегидратационном плавлении метабазитов в интервале температур 850-1000°C и давлений 1-7 кбар образуется кислый расплав и ассоциация минералов, представленная 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 основании расчетов равновесных температур, с использованием экспериментальных данных (Beard, Lofgren, 1991), дацит-риолитовая магма, участвующая в образовании синкальдерных и посткальдерных вулканических пород вулкана Меньший Брат могла быть образована при дегидратационном плавлении метабазитов островодужной коры в интервале давлений 1-3 кбар. Она представлена кислым расплавом и перитектическим парагенезисом основного плагиоклаза, авгита и энстатита. Образование этого парагенезиса происходило в интервале температур 895-1190°C. Источником тепла, под действием которого происходило плавление коры, могла являться базальтовая магма, температура которой составляла 1220°C. Это хорошо согласуется с современными представлениями об образовании крупных очагов кислых магм при плавлении коровых субстратов под действием тепла горячих базитовых магм (Hildreth, 1981; Smith, Leeman, 1987; Atherton, Petford, 1993; Rapp, Watson, 1995; Dungan, Davidson, 2004).

### Заключение

В главе «*Заключение*» предложена модель образования пород, слагающих вулкан *Меньший Брат* (Рис. 15). На кальдерообразующем этапе происходит серия извержений кислого магматического очага с образованием крупной кальдерной депрессии и толщи игнимбритов и риолитовых пемзовых туфов. Завершающая стадия кальдерообразования характеризуется извержением вулканитов андезит-дацитового состава. Магмы, из которых образованы внутрикальдерные экструзивные купола образованы при смешении двух контрастных по составу компонентов. Первый из них это кислые магмы, образованные при плавлении метабазитов, а второй – базитовый мантийный расплав. Ведущая роль в этом взаимодействии отводится базальтовому расплаву, влияние которого проявляется как на кальдерном, так и на посткальдерном этапе вулканической активности в кальдере *Медвежья*.

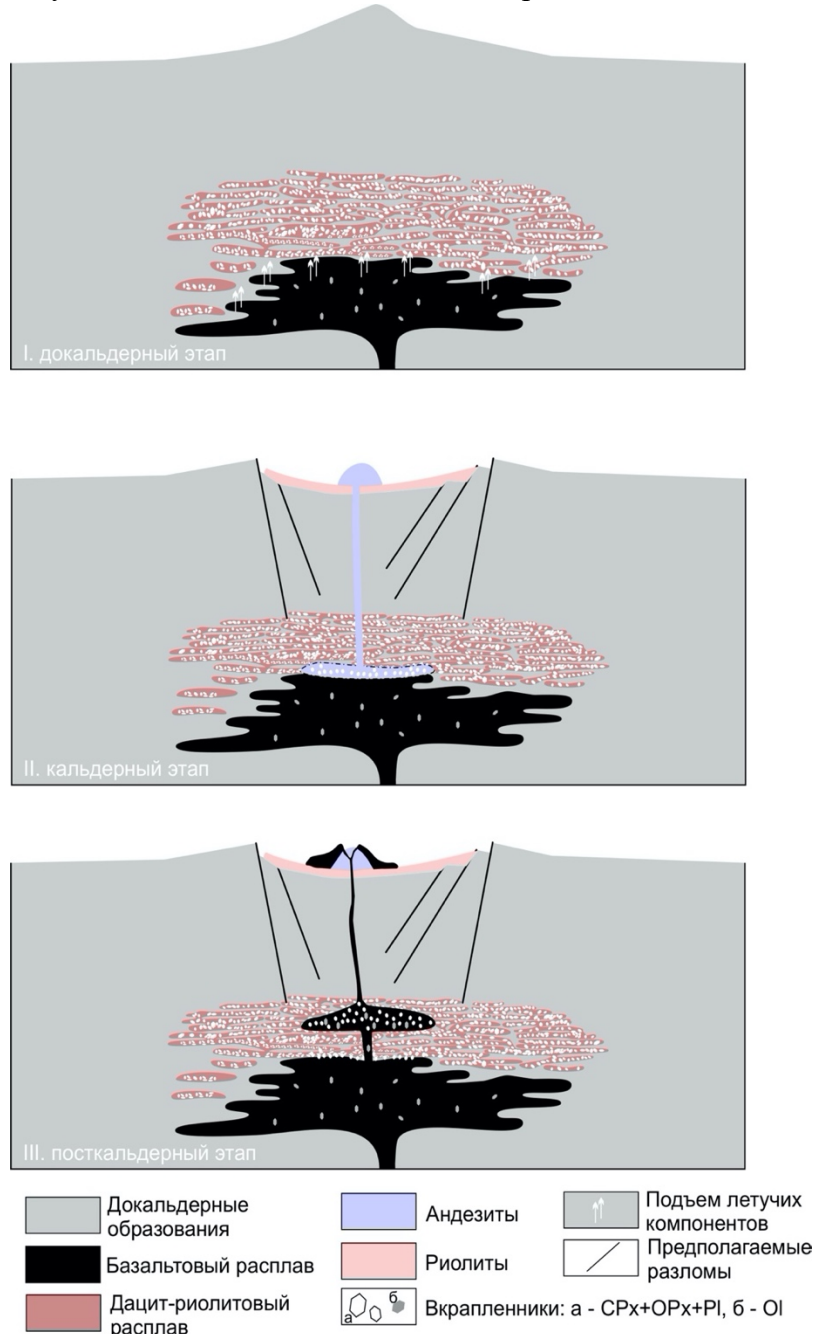


Рис. 15. Петрогенетическая модель вулканизма кальдеры *Медвежья*

Посткальдерная стадия характеризуется извержениями базальтов, андезибазальтов 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.

### 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 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 вкрапленниках 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. Владимиров. - 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.