



Материалы
Всероссийской
конференции
с международным
участием

Петрология магматических и метаморфических комплексов

Выпуск 9



УДК 551.24
ББК 26.303

Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 9. Материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2017. – 475 с.

В сборнике представлены материалы 9-й научной конференции по проблемам генезиса, моделирования условий формирования, структурной организации и минерагении магматических и метаморфических комплексов. Рассмотрены вопросы их геохронологической корреляции и формационной типизации.

Для специалистов в области петрографии, геологической съемки и прогноза месторождений полезных ископаемых.

Редакционная коллегия: Эрнст Р.Э., Кузьмин М.И., Врублевский В.В., Гуттиерез-Алонсо Г., Крук Н.Н., Цыганков А.А., Тишин П.А., Гертнер И.Ф., Краснова Т.С., Владимиров А.Г., Вологодина И.В., Чернышов А.И.

Технические редакторы – Гертнер И.Ф., Дугарова Н.А.

Оригинал-макет – А. Бакшаева

Кафедра петрографии Томского государственного университета

Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Issue 9 Proceeding of science meeting. – Tomsk: Tomsk CSTI Publishing house. 2017. – 475 p.

The collection includes reports from the 9th science meeting according petrology of magmatic a metamorphic rocks and their metallogeny and structural construction. Questions of their correlation and formation type are discussed.

The book is interesting for specialists in the field of petrography and geological survey and proposal of ore deposits.

Scientific editors: R.E. Ernst, M.I. Kus'min, V.V. Vrublevskii, G. Gutierrez-Alonso, N.N. Kruk, A.A. Tsygankov, P.A. Tishin, I.F. Gertner, T.S. Krasnova, A.G. Vladimirov, I.V. Vologdina, A.I. Chernyshov.

Technical editors – I.F. Gertner, N.A. Dugarova.

Original design – A. Bakshaeva

Petrography department of Tomsk State University

ISBN 978-5-89702-432-2

ВОДА В РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ ИЗ ВКРАПЛЕННИКОВ ДАЦИТОВЫХ ПЕМЗ ПЕРЕШЕЙКА ВЕТРОВОЙ (О.ИТУРУП, ЮЖНЫЕ КУРИЛЫ)

Котов А.А.^{1,2}, Смирнов С.З.^{1,3}, Максимович И.А.^{1,2}, Плечов П.Ю.⁴, Черткова Н.В.⁵, Бефус А.И.⁶

¹Институт геологии и минералогии им.В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск,

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск;

³Томский Государственный Университет, Томск;

⁴Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН;

⁵Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка;

⁶University of South Florida, School of Geosciences, Tampa, Florida.

WATER IN MELT INCLUSIONS FROM PHENOCRYSTS OF DACITE PUMICE OF THE VETROVOY ISTHMUS (ITURUP ISLAND, SOUTHERN KURILES)

Kotov A.A., Smirnov S.Z., Maksimovich I.A., Plechov P.Yu., Chertkova N.V., Befus A.I.

This work is devoted to the study of one of the largest caldera eruptions of the Kurile-Kamchatka island-arc system that occurred on the island of Iturup. The object of investigation of this work are phenocrysts of quartz and plagioclase from dacite pumice of the Isthmus of the Isthmus, which is located on the island of Iturup. The purpose of this work is to determine the water content in the melts that participated in the caldera eruption of the Vetrovoy Isthmus and the patterns of their changes during the crystallization of magma. In the course of the work, the following were carried out: 1) adaptation and calibration of the Raman spectroscopy method for determining water in rhyolite melt's inclusions glasses in quartz and plagioclase from pumice stone; 2) determination of composition and estimation of water content in melt inclusions in quartz and plagioclase according to x-ray spectral analysis; 3) establishment of the regularities of the change in the water content during the evolution of the magmatic melt; 4) evaluation of fluid pressure by comparison with experimental data.

Введение

Катастрофические извержения, как правило, связаны с проявлениями кислого вулканизма. Наиболее изученными примерами являются извержения вулканов Санторин (Druitt, 2014), Тоба (Chesner, 1998; Chesner, Luhr, 2010), Пинатубо (Borisova, 2005) и др. Для кислых магм, вызывающих катастрофические извержения, характерно высокое содержание летучих, среди которых ведущую роль играют вода и углекислота. В случае с катастрофическим извержением перешейка Ветровой, вода является основным летучим, а такие как CO₂, F и сернистые соединения играют весьма подчиненную роль (Смирнов и др., 2017). Таким образом, определение содержания воды в расплавах является важным инструментом для изучения эволюции обогащенных летучими кислых магм в малоглубинных камерах. Это, в свою очередь, дает возможность реконструировать особенности циркуляции летучих компонентов в верхних горизонтах земной коры и обмена ими с атмосферой.

Существуют различные подходы определения воды в расплавах. Высокоточные методы требуют большого количества вещества и пригодны только для изучения продуктов экспериментов. Однако, для исследования природных расплавов наиболее подходящими являются стекла основной массы вулканических пород или включения затвердевших расплавов в минералах. Для непосредственного определения воды в таких объектах все большую популярность набирает метод рамановской спектроскопии (Chabiron, 1999; Thomas et al., 1999; Thomas, 2000; Behrens et al., 2006; Chabiron et al., 2004; Zajacz et al., 2005; Le Losq et al., 2012; Plechov et al., 2015; Holtz et al., 2005). В данной работе была проведена калибровка для определения воды в расплавных включениях риолитового состава методом рамановской спектроскопии. Для контроля результатов измерений содержания воды была использована оценка с помощью рентгеноспектрального анализа по содержанию кислорода на электронном

микроскопе и определение воды методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном зонде.

Геологическая характеристика района. Перешеек Ветровой (ПВ) представляет собой грабен шириной около 12 км в северной части острова Итуруп Большой Курильской гряды. Грабен заполнен позднеплейстоценовыми пемзово-пирокластическими отложениями роковской свиты мощностью более 260 м. Объемы изверженного материала ПВ составляют около 100 км³ (Мелекесцев и др., 1988). Вышеуказанные параметры исследуемого вулканического события дают возможность утверждать, что извержение перешейка Ветровой является одним из самых крупных вулканических событий на Курило-Камчатской дуге в позднем плейстоцене – раннем голоцене.

Минералогия и петрография пемз перешейка Ветровой. Породы, перешейка Ветрового представлены туфами и туфитами с обломками светлых пемз. Пемзы содержат большое количество порфирированных вкрапленников (25-30%), которые находятся в матрице кислого стекла (SiO₂ 73-76 мас. %). Размер вкрапленников достигает 2 мм. Вкрапленники представлены плагиоклазом, кварцем, авгитом (Woll 0.43-0.44, Mg# 0.73-0.74), гиперстеном (Mg# 0.62-0.64) и Fe-Ti оксидами. Для пемз ПВ характерно отсутствие вкрапленников амфибола, при этом он встречается в виде кристаллических включений в пироксенах и имеет высокоглиноземистый состав (чермакит-роговая обманка Mg# 0.66-0.70). В виде включений в темноцветах и плагиоклазе установлен F-Cl апатит с существенной примесью серы. Сульфиды Fe и Cu образуют каплевидные и полиэдрические включения в темноцветных минералах и Fe-Ti оксидах. Плагиоклаз, темноцветные минералы и Fe-Ti оксиды представляют собой ранний парагенезис кислых пемз, в то время как непосредственно перед извержением образование темноцветных минералов прекратилось, и из расплава кристаллизовались плагиоклаз и кварц (Смирнов и др., 2017).

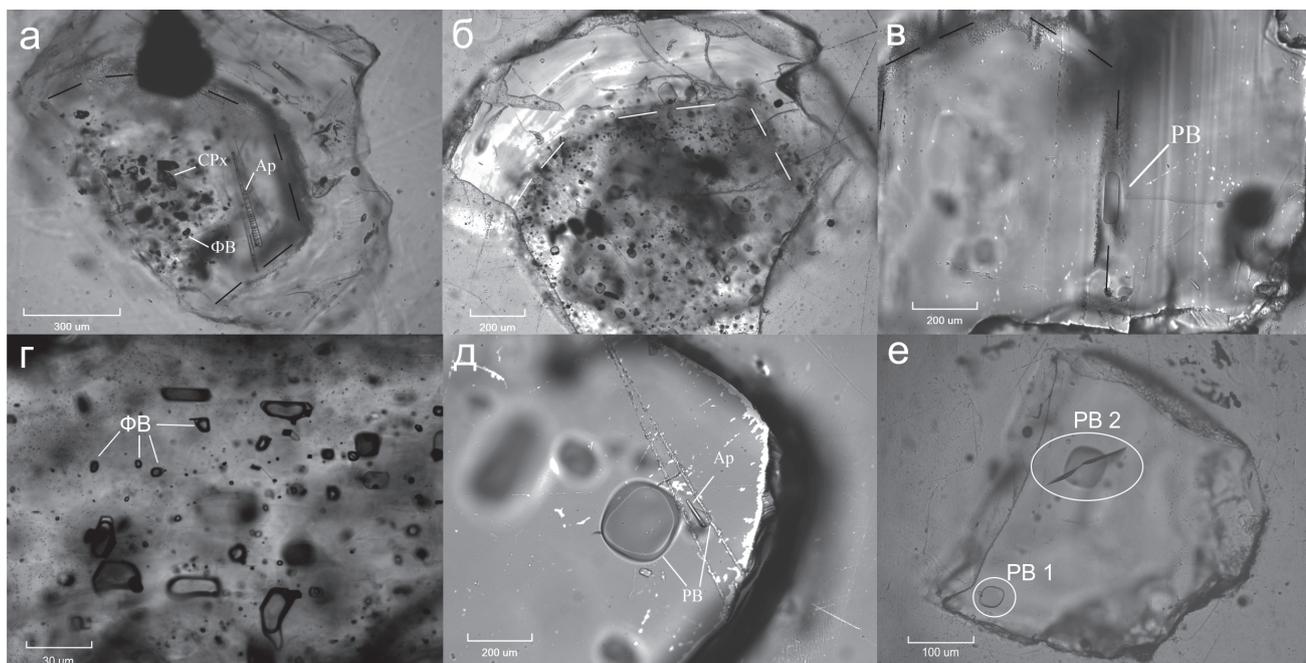


Рис. 1. Особенности зонально-секториального строения и расположения включений минералообразующих сред в плагиоклазе и кварце: (а) плагиоклаз смешанного типа с кристаллическими включениями апатита (Ар), клинопироксена (СРх), расплавленными (РВ) и флюидными включениями (ФВ); (б) плагиоклаз смешанного типа; (в) концентрически-зональный плагиоклаз с РВ, удлинённым вдоль зоны роста; (г) ФВ в плагиоклазе смешанного типа; (д) кварц с РВ и апатитом, захваченным с каплей материнского расплава; (е) кварц с расплавленными включениями, не претерпевшим изменений (РВ 1) и претерпевшим растрескивание в ходе пробоподготовки (РВ 2).

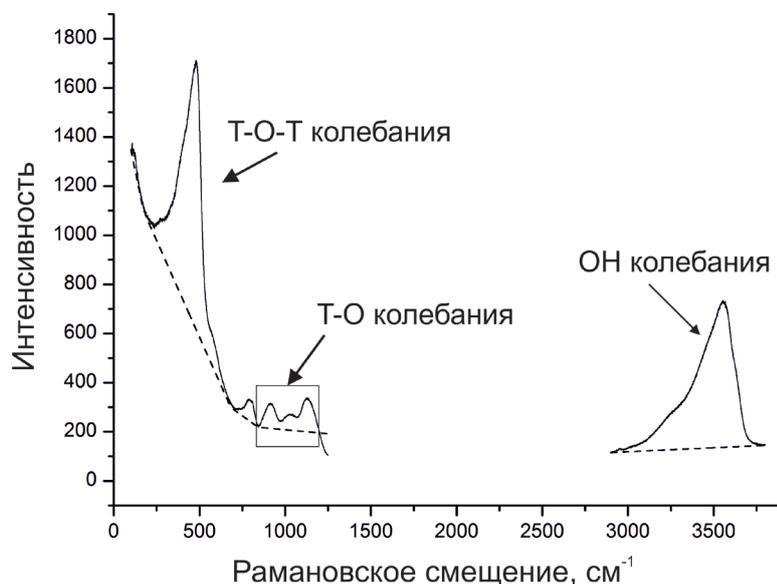


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния эталонного риолитового стекла с 6 мас. % H_2O . Пунктирной линией проведена базовая линия.

Плагиоклаз является наиболее информативным минералом для реконструкции эволюции магмы перед катастрофическим извержением. Его состав варьирует от An_{41} до An_{95} . Вкрапленники плагиоклаза можно разделить на три типа: концентрически-зональный (рис. 1 в), пятнистый и смешанный тип (рис. 1 а, б). Состав концентрически-зональных плагиоклазов варьирует от An_{41} до An_{55} . Расплавные включения в них зачастую сгруппированы вдоль зон роста (рис. 1 в). Плагиоклазы пятнистого типа состоят из блоков (доменов)

среднего (An_{41}) и основного (An_{95}) составов. Кристаллы смешанного типа обладают пятнистым ядром и концентрически-зональной периферией. При этом наиболее ранние концентрические зоны обладают максимально основным составом (An_{95}).

Включения минералообразующих сред. Все исследованные минералы содержат большое количество расплавных и флюидных включений, которые либо расположены по зонам роста, либо азонально или захвачены вместе другими мине-

ралами. Все расплавные включения в нормальных условиях (25°C, 1 атм.) могут быть поделены на три группы по фазовому составу: 1) однофазные, полностью стекловатые (рис. 1 в, д, е); 2) двухфазные, содержащие стекло и газовый пузырь; 3) многофазные, сложенные стеклом, кристаллами и/или газовым пузырьком. При этом в виде кристаллических включений, не являющихся дочерними фазами, встречаются апатит, рудные минералы, авгит, гиперстен и амфибол. Для работы отбирались только включения первого типа без признаков декрепитации: так как в них состав летучих почти не претерпел постзахватных изменений.

Флюидные включения (ФВ) встречаются только в плагиоклазе, располагаясь в зонах и участках с максимальным содержанием Ап. Они представлены двухфазовыми существенно газовыми включениями CO₂ с каймой жидкой воды комнатной температуре (рис. 1 а, б, г). ФВ образуют ассоциации с расплавными включениями (РВ). В этом случае некоторые РВ содержат двухфазовое газожидкое флюидное обособление. Эти признаки свидетельствуют об образовании высококальциевых зон плагиоклаза в условиях дегазации.

Методы и результаты исследования

Рентгеноспектральный анализ. Составы стекол, выведенных на поверхность РВ во вкрапленниках пород перешейка Ветровой определялись энергодисперсионным методом рентгеноспектрального анализа (ЭДС). С помощью данного метода было проанализировано 51 расплавных включений в кварце и плагиоклазе на СЭМ Tescan MIRA-3 LMU, оснащенной системой микроанализа, с программным обеспечением INCA Energy 450+ и анализатором X-Max 80 (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток зонда 1.4 - 1.6 нА, диаметр фокусированного электронного пучка 10 нм. Время счета 60 секунд. При данных параметрах анализа пределы обнаружения разных элементов варьируют в пределах 0.1-0.3 мас. %. Анализ стекла включения проводился сканированием площадки 10x10 мкм для уменьшения эффекта потери натрия (Lineweaver, 1963; Morgan, London, 1996; Morgan, London, 2005). Для каждого включения проводилось два анализа стекла и один анализ минерала-хозяина вблизи включения. Анализ минерала осуществлялся для контроля правильности. При необходимости вводилась коррекция.

Рамановская спектроскопия. Спектр водосодержащего силикатного стекла представлен на рисунке (рис. 2). Линии в диапазонах 100-1250 см⁻¹ отвечают колебаниям Si-O-Si, Al-O-Si и Si-O в структуре алюмосиликатных стекол. Широкая асимметричная полоса в диапазоне 2900-3800 см⁻¹ отвечает колебаниями связей O-H в молекулах воды и гидроксильных группах, входящих в состав силикатных стекол (Анфилогов, Быков, 1998). В силу того, что структуры силикатных стекол в большинстве случаев соответствуют структурам силикатных жидкостей, можно считать, что спектральные характеристики стекол являются адекватной отражением структурного положения воды в силикатных расплавах.

Исследование расплавных включений методом рамановской спектроскопии проводилось на спектрометре LabRAM HR 800 в ИГМ СО РАН им. В.С.Соболева. Поиск анализируемого включения осуществлялся с помощью встроенного поляризационного микроскопа Olympus BX-41. В ходе работы для возбуждения использовался лазер с длиной волны 532 нм и выходной мощностью 75 мВт. Регистрация проводилась с помощью ССД детектора с рабочей температурой -120 °С, охлаждаемым жидким азотом. Анализ проводился в геометрии обратного рассеяния. Для сбора рассеянного света использовался объектив 100x. Спектры были получены

в диапазоне 100-1250 см⁻¹ и 2800-4000 см⁻¹. Конфокальное отверстие и время накопления спектра регулировалось в зависимости от размера и глубины нахождения включения. В ходе работы установлено, что изменение размера конфокального отверстия не влияет на качество и результат съемки, а лишь прямо пропорционально увеличивает или уменьшает интенсивности линий (рис. 3 а). Также различное время накопления сигнала в рамках одной смены незначительно влияет на результат ($\pm 0,2$ абс. %) (рис. 3 б). Различия в оценках содержания воды по одним и тем же образцам, полученные в разные дни, колеблются незначительно ($\pm 0,18$ абс. %) (рис. 3 в). Вариации времени накопления изменялись в ходе работы от наименьших 25 сек/спектральное окно (5x5) в случае, если включение большого размера и минерал-хозяин при анализе захватывается минимально, до максимальных 400 сек/спектральное окно (20x20) в случае, если включение не выведено на поверхность и/или имеет незначительный размер и влияние минерала-хозяина на спектре значительно и не позволяет качественно обработать его.

Методика определения воды с помощью рамановской спектроскопии. Метод количественного определения содержания воды основан на вычислении отношения площади пика в диапазоне 2900-3800 см⁻¹ (Aw), к сумме площадей пиков в диапазоне 850-1250 см⁻¹ (As) (Рис. 2) (Zajacz et al., 2005; Le Losq et al., 2012). Данное отношение (Aw/As) находится в прямой зависимости от содержания воды в анализируемом стекле. В ходе работы была проведена калибровка по пяти эталонным синтетическим стеклам риолитового состава с содержаниями воды от 2 до 6 мас. %, которые предварительно были проанализированы титрованием по методу Карла-Фишера, а также методами рентгеноспектрального микроанализа и вторично-ионной масс-спектрометрии (рис. 3 г). Каждое из измеренных включений анализировалось методом рентгеноспектрального микроанализа.

Ранее было показано, что спектры силикатных и алюмосиликатных стекол значительно отличаются в зависимости от их состава (Zajacz et al., 2005; Plechov et al., 2015). В связи с этим результаты калибровки были проверены на серии эталонных стекол кислого состава из коллекции МГУ. Эти стекла получены путем переплавления природного обсидиана в присутствии воды (Степанов и др., 2016). Содержания воды в этих стеклах измерены с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии (рис. 4 б), и рамановской спектроскопии (рис. 4 а). При исследовании данных стекол с помощью рамановской спектрометрии на базе ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева, было получено 16 измерений по четырем препаратам (Che n2-n4, Che n9). На их основании можно сделать заключение, что результаты, полученные по стеклам с содержанием воды менее 8 мас. % совпадают с результатами, полученными на ионном зонде и рамановской спектрометрией в МГУ, а при анализе стекла с 10 мас. % H₂O появляется значимое отклонение (рис. 4 а, б). Вероятно, большая ошибка в измерениях связана с отличиями в составах обсидиановых эталонных стекол из коллекции МГУ и синтетических эталонных стекол ИГМ СО РАН. В связи с этим можно предполагать, что проведенная нами калибровка по синтетическим стеклам риолитового состава может быть успешно применена к природно-закаленным стеклам близкого состава с содержанием воды менее 8 мас. %.

При обработке спектров комбинационного рассеяния вычиталась базовая линия, которая проводилась по глобальным минимумам спектра в исследуемой области. После вычитания базовой линии проводилась деконволюция низкочастотной части спектра с помощью программы Fityk. При деконволюции выделялись линии 915 см⁻¹, 1025 см⁻¹, 1127 см⁻¹.

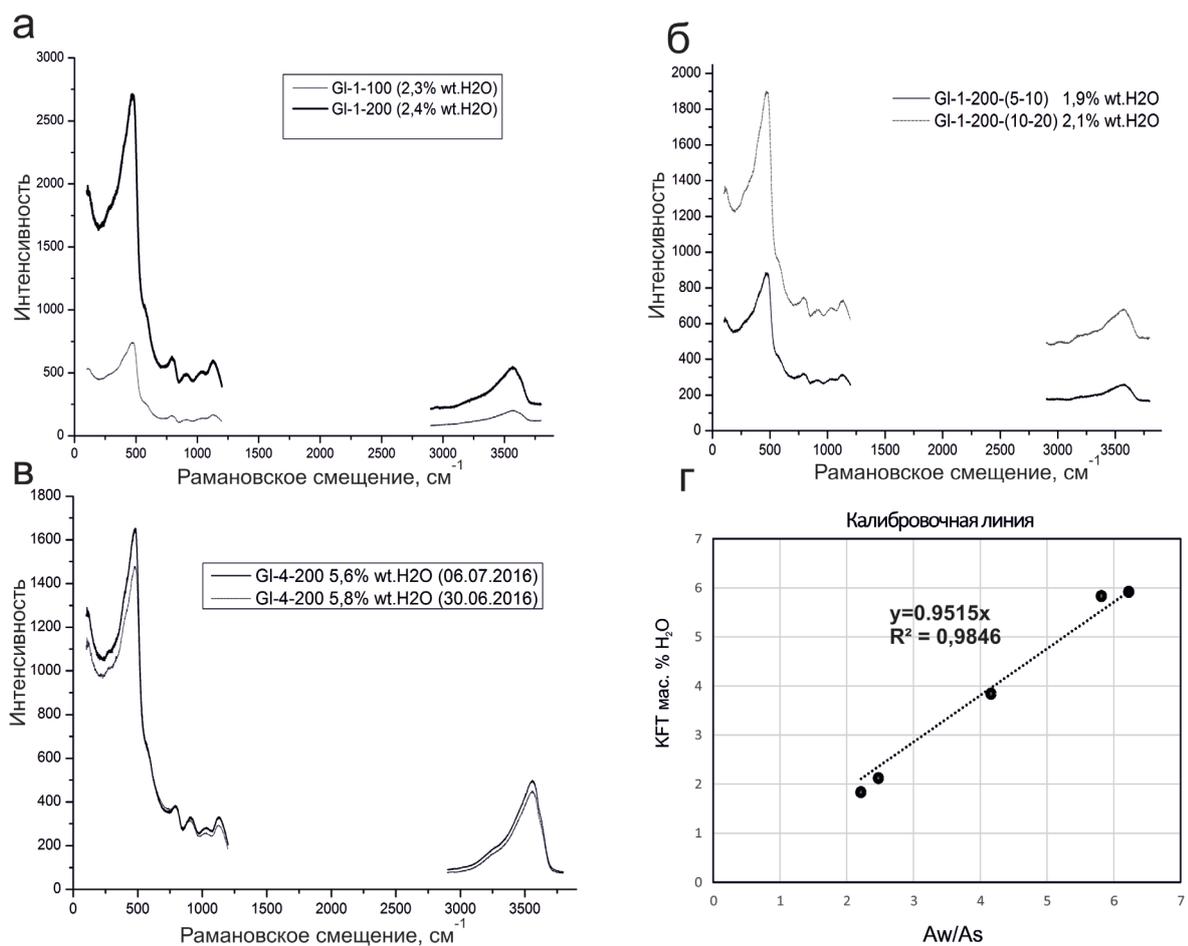
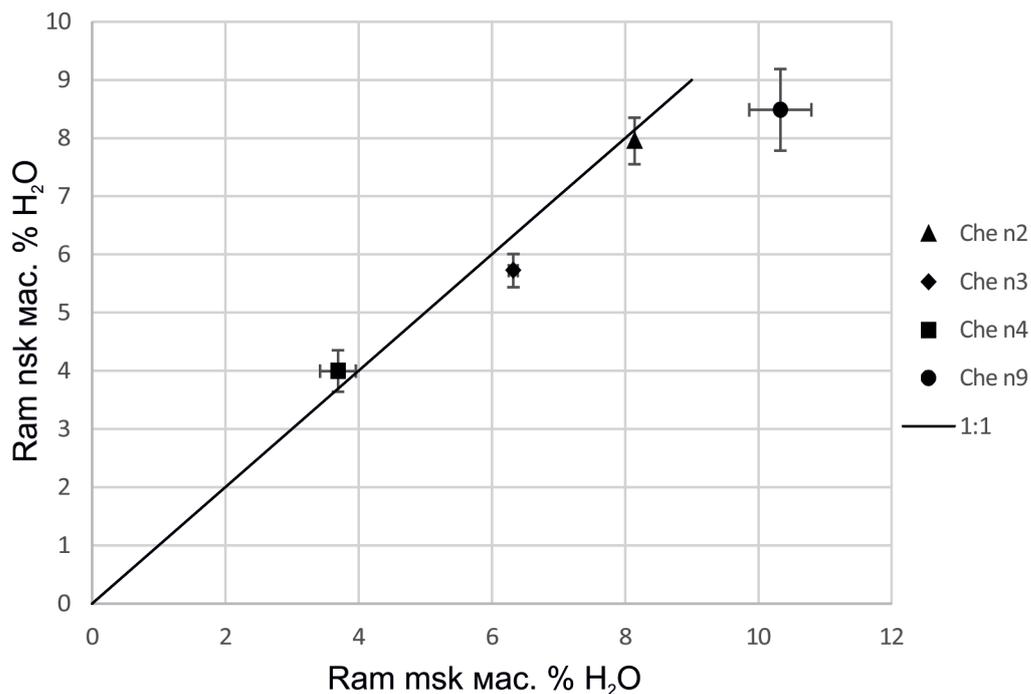


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния стекол с известными содержаниями воды, проанализированных (а) в один день с различным диаметром конфокального отверстия; (б) в один день с различным временем накопления сигнала; (в) в разные дни при одинаковых условиях; (г) калибровочный график для определения воды в стеклах риолитового состава (KFT – титрование методом Карла-Фишера, Aw/As – отношение площади пика высокочастотной части спектра (2900-3800 см⁻¹) к сумме площадей в низкочастотной части (850-1250 см⁻¹).



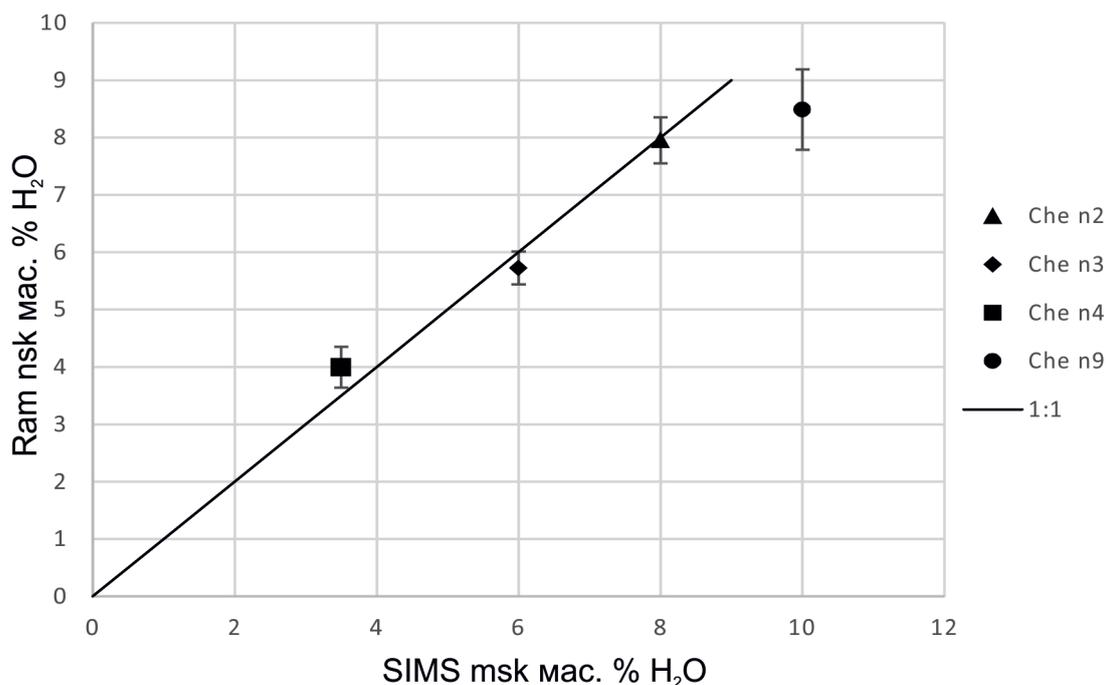


Рис. 4. Сравнение содержаний воды в эталонных стеклах из коллекции МГУ (а) полученных с помощью рамановской спектроскопии на базе ИГМ СО РАН (Ram nsk) и МГУ (Ram msk); (б) полученных с помощью рамановской спектроскопии на базе ИГМ СО РАН (Ram nsk) и вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS msk).

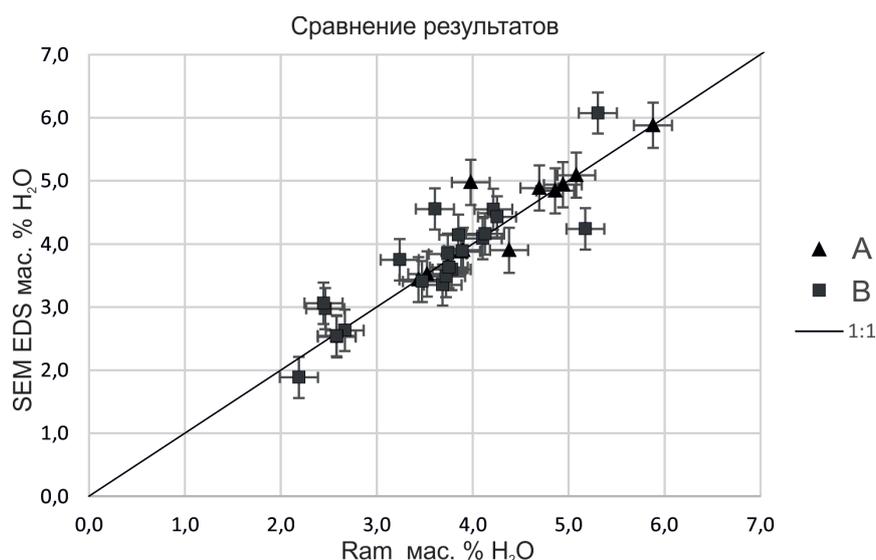


Рис. 5. Сравнение оценок содержаний воды в расплавных включениях во вкрапленниках (А) плагиоклаза и (В) кварца, определенные методом рамановской спектроскопии (Ram) и энергодисперсионным методом рентгеноспектрального анализа (SEM EDS).

После этого проводилось определение площадей выделенных линий в обоих диапазонах. Площади в диапазоне 850-1250 cm^{-1} суммировались. В случае, если спектр комбинационного рассеяния в этих диапазонах осложнен пиками не отвечающими указанным колебаниям, то их влияние вычиталось при деконволюции.

Содержание воды в расплавных включениях. Сопоставление результатов измерения содержания воды в стеклах РВ методами ЭДС и рамановской спектроскопии представлены на графике (рис. 5).

РВ в кварце являются наиболее благоприятными для анализа содержания воды методом рамановской спектроскопии

так как в нем содержится большое количество однофазных стекловатых расплавных включений, зачастую достигающих размеров более 200 мкм и влияние спектра минерала-хозяина не осложняет те части спектра, которые измеряются для оценки содержания воды (рис. 6 в). Линии плагиоклаза накладываются на измеряемые части спектра, и это оказывает большее влияние на оценки содержания.

На основании полученных данных можно утверждать, что содержания воды в кварце варьируют от 2,0 до 6,0 мас. %. Концентрации воды в РВ, принадлежащих одной ассоциации, показывают удовлетворительную сходимость (рис. 6 а, б).

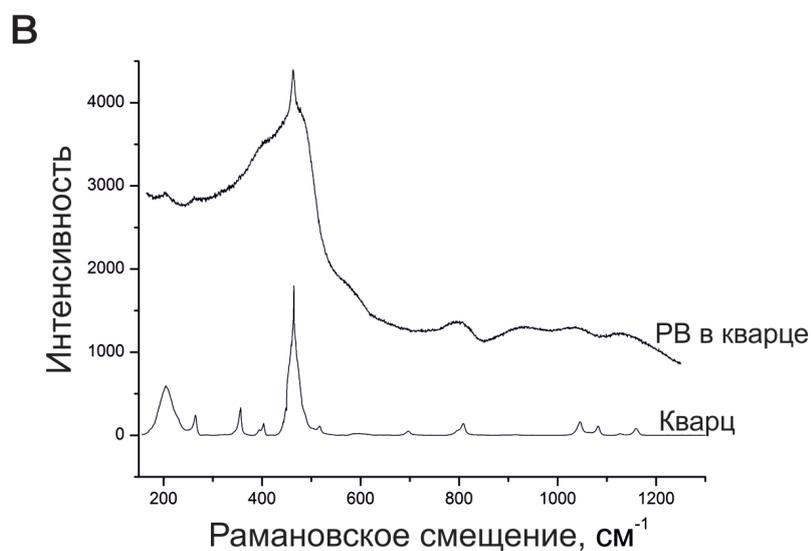
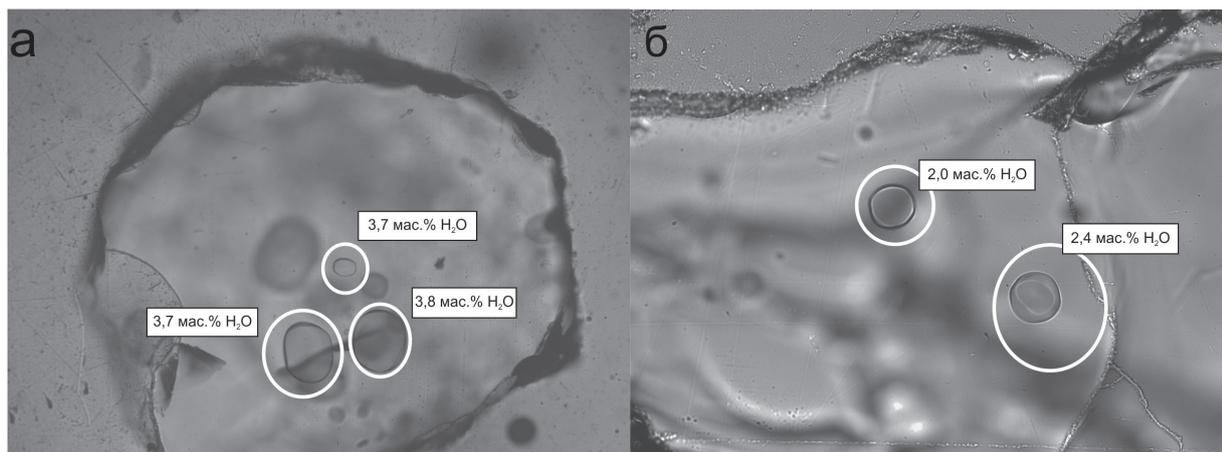


Рис. 6. Расплавные включения во вкрапленниках кварца (а) ИТ-15-47-4 и (б) ИТ-15-63-25 и содержания воды в них; (в) сравнение спектра комбинационного рассеяния расплавного включения в кварце со спектром кварца.

В плагиоклазе встречаются расплавные включения с содержанием воды от 3,0 до 6,0 мас. %. При этом включения с наибольшим содержанием воды немногочисленны и встречаются в плагиоклазе с высоким содержанием Са, вплоть до An# 95. Расплавные включения с содержанием воды 3,0-4,5 мас. % встречаются лишь по зонам роста концентрически-зонального плагиоклаза соответствующего по составу андезину или лабрадору.

Обсуждение результатов. Полученные результаты показали, что расплавы кальдерного извержения перешейка Ветрового содержали воду в количестве близком к насыщению для магм дацитового и риолитового состава. Наличие амфибола в виде включений в других минералах и отсутствие в виде собственных вкрапленников дает основание предполагать, что давление в магматической камере оказалось ниже порога стабильности этого водосодержащего минерала. В этих условиях насыщение расплава водой должно привести к дегазации – отделению водного флюида. Дегазация магмы в очаге кальдерного извержения действительно имела место и это зафиксировано в виде ассоциаций флюидных и расплавных включений в высококальциевых зонах и участках вкрапленников плагиоклаза. Образование высококальциевого плагиоклаза с

Ап>>70 мол. % из риолитового расплава требует специфических условий. Такой плагиоклаз более характерен для магм основного состава. Однако помимо химизма самой магмы основность плагиоклаза может повышаться и при повышении парциального давления воды, что было продемонстрировано экспериментами (Panjasawantwong et al., 1995) и термодинамическими расчетами (Plecho, Gerya, 1998). Исследования флюидных и расплавных включений показывают, что образование высококальциевых зон плагиоклаза в пемзах перешейка Ветрового связано с этапом дегазации, которому должно было предшествовать повышение парциального давления воды в очаге. Данному этапу соответствует содержание воды в расплаве не менее 6,0 мас. % H₂O о чем свидетельствуют максимальные концентрации воды в РВ из высококальциевых участков вкрапленников. Дальнейшее снижение содержания кальция свидетельствует о переуравновешивании плагиоклаза с расплавом при более низком давлении. Рост концентрически-зонального плагиоклаза происходил из расплава с содержанием воды 3,0-4,5 мас. %.

Отсутствие флюидных включений во вкрапленниках кварца указывает на то, что он кристаллизовался после дегазации. При этом содержания воды в РВ также варьируют от

2,0 до 6,0 мас. % H₂O. Предполагая кристаллизацию кварца на самом позднем этапе эволюции магматической камеры, вместе с концентрически-зональным плагиоклазом An₄₅₋₅₅ можно ожидать, что содержания воды в РВ должны изменяться в более узком диапазоне 3,0-4,5 мас. % H₂O.

Риолитовые расплавы обладают очень высокой вязкостью, которая еще более увеличивается при дегазации. Из этого следует, что в различных участках магматический очаг дегазировал в различной степени, что могло привести к значительным различиям по содержанию H₂O. Начало кристаллизации кварца в участках с сильно дегазированной магмой может объяснить захват расплава с низкими (до 2 мас. % H₂O) содержаниями воды. Высокие содержания воды можно отнести к участкам камеры, которые сохранили герметичность и в них не произошло отделения флюидной фазы. Кроме этого возможен сценарий, предполагающий рост содержания воды после дегазации за счет кристаллизации безводных минералов или поступления в ее магматический очаг из вмещающих пород за счет термической дегидратации водосодержащих минералов. Это обогащение могло послужить причиной финального катастрофического извержения, следы которого мы видим на перешейке Ветровом.

Флюидное давление. Температуры кристаллизации вкрапленников в пемзах перешейка Ветровой, определенные по плагиоклаз-жидкостному и двупироксеновому геотермометрам составляют 800-850 °С. Из экспериментальных работ известно, что для гаплогранитных систем при температурах 800-850 °С и давлении 1 кбар растворимость воды в расплаве составляет около 4,0 мас. % H₂O, а при 2 кбар уже 6,0 мас. % H₂O (Кадик и др., 1971; Botcharikov et al., 2006; Moore et al., 1998; Newman, Lowenstern, 2002). Это также находит подтверждение в работах, посвященных извержениям вулкана Тоба (о. Суматра) (74 тыс. лет назад) (Chesner, Luhr, 2010; Chesner, 1998) и вулкана Св. Елены (США) (извержение 1980 г.) (Riker et al., 2005), где для расплавов, состав которых близок к расплаву ПВ, определены содержания воды 3,0-6,0 мас. % H₂O и температуры кристаллизации около 800 °С. На основании полученных данных и вышеуказанных экспериментальных работ определены значения флюидного давления в диапазоне 0,8-2 кбар.

Исследования флюидных включений показали, что в результате дегазации выделялся водно-углекислотный флюид с молекулярным соотношением H₂O/CO₂ не менее 0,91 (расчет по модели Duan et al., 1992) с общей плотностью 0,12 г/см³. Такой состав флюида способствует стабилизации амфибола при давлениях более 0,5 – 1 кбар для 850°C (Rieker et al., 2015; Cadoux et al., 2014; Holtz et al., 2005). Давление флюида в момент дегазации при температуре 850°C оценивается 0,64 кбар, что действительно отвечает пределу стабильности этого минерала.

Опираясь на содержания воды в РВ, данные по ФВ и составам РВ, можно оценить растворимость CO₂ и давление насыщения в расплавах перешейка Ветрового, используя модель (Papale et al., 2006). Полученные величины дают давления насыщения, варьирующие от 0,4 – 0,6 кбар для содержаний воды менее 3 мас. % до 1,1 – 1,9 кбар для содержаний воды более 4 мас. %. При этом растворимость CO₂ в расплавах составила 70 – 100 г/т.

Вероятно, после дегазации флюидное давление в расплаве могло упасть до 0,64 кбар, оцененных по флюидным и расплавленным включениям. Большое количество РВ с содержанием воды 3,0-4,0 мас. % в позднем плагиоклазе с An₄₅₋₅₅ указывают на некоторую стабилизацию системы после дегазации при давлении около 1 кбар. Это может быть результатом герметизации всей камеры или отдельных ее участков.

Вероятной причиной герметизации могут быть гидротермальные процессы в породах экзоконтакта, в результате которых произошло «залечивание» трещин и заполнение порового пространства в них метасоматическими минералами. Наши данные предполагают также, что дальнейшая кристаллизация могла происходить на фоне повышения концентрации воды в расплаве и роста давления, предшествовавшего катастрофическому извержению.

Заключение. Составы стекол расплавных включений позволяют утверждать, что кристаллизация вкрапленников дацитовых пемз катастрофического извержения ПВ происходила из риолитового расплава с содержанием воды 2,0-6,0 мас. % и углекислоты 70-100 г/т. Значительные вариации содержаний воды свидетельствуют о значительных вариациях флюидного давления от 0,4 до 1,9 кбар в период, предшествовавший катастрофическому извержению. Магматический очаг претерпел дегазацию на ранних этапах своего развития, что привело к значительному снижению содержания воды (до 2 – 3 мас. %). Однако после этой дегазации, вероятно, произошло новое обогащение расплава водой вплоть до достижения концентраций насыщения. Глубина очага способствовала стабилизации давления вблизи величины 1 кбар, что препятствовало кристаллизации амфибола, и позднее обогащение расплава водой могло быть обусловлено кристаллизацией безводных пироксенов, плагиоклаза и кварца.

Работа выполнена в рамках проекта 0330-2016-0005 госзадания ИГМ СО РАН и при поддержке гранта РФФИ 16-05-00894. Рентгеноспектральный анализ проводился в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований.

Список литературы

1. Анфилогов В.Н., Быков В.Н., Силикатные расплавы. Строение, термодинамика, физические свойства // 1998, Миасс: ИМин УрО РАН – 160с.
2. Кадик А.А., Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И., Вода в магматических расплавах // М., Наука, 1971, 267с.
3. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д., Катастрофические эксплозивные извержения вулканов Курило-Камчатской области в конце плейстоцена-начале голоцена // ДАН СССР, 1988, Т. 300, №1, С. 175-181.
4. Смирнов С.З., Рыбин А.В., Соколова Е.Н., Кузьмин Д.В., Дегтерёв 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
5. Степанов О.В., Черткова Н.В., Плечов П.Ю., Персиков Э.С., Бухтияров П.Г. Аналитические методы определения высоких концентраций воды в обсидиановых стеклах // Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. Москва, 19-20 апреля 2016 года. (ВЕСЭМПГ-2016). (ГЕОХИ РАН), 2016, С. 50-51
6. Behrens H., Roux J., Neuville D.R., Siemann M., Quantification of dissolved H₂O in silicate glasses using confocal microRaman spectroscopy // Chemical Geology, 2006 V.229. P.96-112
7. Borisova A.Yu., Constrains on dacite magma degassing and regime of the June 15, 1991, climatic 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.
8. Botcharikov R.E., Behrens H., Holtz F., Solubility and

- speciation of C-O-H fluids in andesitic melt at T=1100-1300 °C and P=200 and 500 MPa // *Chemical Geology*, 2006 V.229 P.125-143.
9. Cadoux A., Scaillet B., Druitt T.H., Deloule E., Magma storage conditions of large plinian eruptions of Santorini volcano (Greece) // *Journal of Petrology*, 2014, V.55 P.1129-1171
 10. Chabiron A., Pironon J., Massare D., Characterization of water in synthetic rhyolitic glasses and natural melt inclusions by Raman spectroscopy // *Contrib Mineral Petrol*, 2004, V.146 Iss.4 P.485
 11. Chabiron A., Peiffert C., Pironon J., Cuney M., Determination of water content in melt inclusions by Raman spectrometry // *Terra Nostra*, 1999, ECROFI XV Abstracts P.68–69
 12. Chesner C.A., Petrogenesis of the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia // *Journal of Petrology* 1998 V.39. Iss.3. P.397-438.
 13. Chesner C.A., Luhr J.F., A melt inclusion study of the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2010 V.197, P.259-278.
 14. Druitt T.H. New insights into the initiation and venting of the Bronze-Age eruption of Santorini (Greece), from component analysis // *Bull. Volcanol.* 2014 V.76. P.794.
 15. Duan Z., Moller N., Weare J.H., An equation of state for CH₄-CO₂-H₂O system: Pure system for 0 to 1000 °C and 0 to 8000 bars // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, V. 56. P.2605-2617.
 16. Holtz F., Sato H., Lewis J. et al. Experimental petrology of the 1991-1995 Unzen dacite, Japan. P.I: Phase relations, phase compositions and pre-eruptive conditions // *Journal of Petrology* 2005 V.46. Iss.2. P.319-337.
 17. Le Losq C., Neuville D. R., Moretti R., Roux J., Determination of water content in silicate glasses using Raman spectrometry: Implications for the study of explosive volcanism // *Am. Mineral.*, 2012, V.97. Iss.5-6. P.779-790.
 18. Lineweaver J.L., Oxygen outgassing caused by the electron bombardment of glass // *J. Appl. Phys.*, 1963, V.34. P. 1786-1791.
 19. Moore G., Vennemann T., Carmichael I.S.E., An empirical model for the solubility of H₂O in magmas to 3 kilobars // *American Mineralogist*, 1998 V.89, P.36-42.
 20. Morgan G. B., London D., Optimizing of electron microprobe analysis of hydrous alkali glasses // *Am. Mineral.*, 1996, V.81. P.1176-1185.
 21. Morgan G. B., London D., Effect of current density on the electron microprobe analysis of alkali aluminosilicate glasses // *Am. Mineral.*, 2005, V.90. P.1131-1138.
 22. Newman, S., Lowenstern, J. B., VolatileCalc: a silicate melt–H₂O–CO₂ solution model written in Visual Basic for Excel // *Computers & Geosciences*, 2002, V.28 Iss.5 P.597-604.
 23. Panjasawatwong Y., Danyushevsky L.V., Crawford A.J., Harris K.L, An experimental study of the effects of melt composition on plagioclase-melt equilibria at 5-kbar and 10-kbar - implications for the origin of magmatic high-An plagioclase // *Contrib Mineral Petrol.*, 1995, P.420–432.
 24. Papale P., Moretti R., Barbato D. The compositional dependence of saturation surface of H₂O+CO₂ fluids in silicate melts // *Chemical Geology*, 2006, V. 229. P. 78-95.
 25. Plechov P.Yu., Blundy J., Nekrylov N., Melekhova E., Shcherbakov V., Tikhonova M.S., Petrology and volatile content of magmas erupted from Tolbachik Volcano, Kamchatka, 2012-13 // *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2015.
 26. Plechov P.Y., Gerya T.V., Effect of H₂O on plagioclase-melt equilibrium // *Experiment in Geosciences*, 1998, P.7–9.
 27. Riker J.M., Blundy J.D., Rust A.C., Botcharnikov R.E., Humphreys M.C.S., Experimental phase equilibria of a Mount St. Helens rhyodacite: a framework for interpreting crystallization paths in degassing silicic magmas // *Contrib Mineral Petrol.*, 2005, V.170. Iss. 6.
 28. Thomas, R., Webster, J.D., Heinrich, W., 1999. Melt inclusions in pegmatite quartz: complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids? // *Terra Nostra*, 1999, ECROFI XV Abstracts P.305–307.
 29. Thomas R., Determination of water contents of granite melt inclusions by confocal laser Raman microprobe spectroscopy // *Am. Mineral.*, 2000, V.85
 30. Zajacz Z., Halter W., Malfait W.J., Bachmann O., Bodnar R.J., Hirschmann M.M., Mandeville C.W., Morizet Y., Muntener O., Ulmer P., Webster J.D., A composition-independent quantitative determination of the water content in silicate glasses and silicate melt inclusions by confocal Raman spectroscopy // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2005 V.150 P.631-642.