

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Национальный
исследовательский
Томский
государственный
университет



Петрология магматических и метаморфических комплексов

Выпуск 9

Материалы IX Всероссийской конференции
с международным участием

28 ноября – 2 декабря 2017 года

Томск 2017

ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ОЧАГОВ КРУПНЫХ КАЛЬДЕРООБРАЗУЮЩИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВЫХ КАЛЬДЕР ОСТРОВА ИТУРУП (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

Смирнов С.З.^{1,3}, Максимович И.А.², Котов А.А.², Тимина Т.Ю.¹, Бульбак Т.А.¹, Томиленко А.А.¹,
Кузьмин Д.В.^{1,2}, Шевко А.Я.¹, Рыбин А.В.⁴

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ Томский государственный университет, Томск

⁴ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

FLUID REGIME OF MAGMA RESERVOIRS OF LARGE-SCALE CALDERA-FORMING ERUPTIONS BY EXAMPLE OF PLEISTOCENE-HOLOCENE CALDERAS AT THE ITURUP ISLAND (KURILE ISLANDS)

Smirnov S., Maksimovich I., Kotov A., Tiimina T., Bulbak T., Tomilenko A., Kuzmin D., Shevko A., Rybin A.

Large caldera eruptions are generally confined to subduction zones. They are featured by colossal released energy and frequent catastrophic consequences. They are fast and recover from tenths to thousands km³ of magmatic substance from depth. Large caldera eruptions have notable and sometimes significant climatic effect, affecting the compositions of the Earth atmosphere. Postcaldera hydrothermal processes lead to formation of epithermal and porphyry mineral deposits. All this means that fluids play important role in magmatic processes prior to large eruptions. Nevertheless the details of volatile behavior in the shallow magma reservoir prior to catastrophic volcanic explosions are largely unknown.

The paper represents the results of the study of pre-eruption volatile and fluid behavior in magma chambers beneath two large calderas at the Iturup Island (Great Kuril island row). Wide areas at the north and south of the Iturup Island are covered by Pleistocene-Holocene tuff and pumice deposits. The southern area is related to formation of Lvinaya Past' (LP) 7x8 km caldera. The estimations of volume of the erupted material vary from 20 to 170 km³. The northern area is located at the lowland Vetrovoy Isthmus (VI) and the volume of erupted material is estimated at 100 km³.

Both dacitic magmas were similar in compositions were crystal rich and contained rhyolitic melts. They crystallized at 850°C under strongly oxidized conditions (NNO+2). Magma storage of the VI eruption was shallow (~1 kbar) and increase of the water content lead to degassing and release of the H₂O-CO₂ fluid. The storage of the LP eruption was located deeper (>1.5 kbar) and in contrast to VI similar increase in water content resulted in crystallization of Mg-hornblende. The presence of CO₂ was documented only for fluids released on degassing from the VI reservoir.

Rhyolitic melts of both eruptions were strongly depleted in S. Small amounts of SO₂ were released on degassing of the VI magma, but the most was redistributed between apatite and sulfide. Similarly S was distributed between minerals: apatite and sulfide in the LP magma.

Despite the degassing of the VI reservoir Cl was mostly distributed between the melt and apatite. Probably small amounts left it with aqueous fluids. In the LP reservoir Cl was distributed between the melt, apatite and amphibole.

Similarly to the most of subduction-zone felsic magmas the melts of both eruptions are depleted in F. However F plays important role in the magma evolution. In both reservoirs apatite is a major sink for F, while in VI reservoir some fluorine could be lost with fluids.

The study showed that in the shallow magma reservoirs of large caldera eruptions at the Iturup Island the behavior of H₂O and CO₂ strongly depends on pressure and degassing. Other major volatiles S, Cl and F tend to rest in the crystallizing melts or to be distributed in the crystallized minerals.

Введение

Крупные кальдеры, диаметр которых превышает 3-4 км, являются результатом крупных или даже гигантских извержений, сопровождающихся обрушением вулканической постройки внутри опустошенной магматической камеры. Такие извержения для внутренних и окраинных частей континентов и островных дуг, но большая их часть приурочена к зонам субдукции. Они характеризуются большой мощностью и, часто, катастрофическими последствиями. Результатами наиболее крупных кайнозойских событий такого типа являются кальдеры Ла Гарита (Сев. Америка) (~ 30 млн лет), Йеллоустоун (Сев. Америка) (2,0 – 0,6 млн лет), Тоба (о. Суматра, Малайский архипелаг) (74 тыс лет) и Оруануи (ВЗ Таупо, Новая Зеландия) (26,5 тыс лет). Кальдерные извержения протекают относительно быстро, и на поверхность извлекается из недр десятки и до тысяч кубических километров магматического материала (Bryan et al., 2010). Более слабые кальдерообразующие извержения вулканов Тамбора (о. Сумбава, Малайский архипелаг) (1815 г.) и Кракатау (Зондский

пролив) (1883 г.) привели к региональным катастрофам и существенному изменению климата в северном полушарии. Помимо того, что крупные кальдерные извержения оказывают заметное, а иногда и значительное влияние на климат, после извержения в кальдерах могут развиваться обширные гидротермальные системы, с которыми связаны эпitherмальные и порфировые рудные месторождения. Все это указывает на важную роль, которую в этих процессах играют различные летучие компоненты.

Состав магматогенной флюидной фазы можно оценить на основе геохимии газовых эманаций вулканов и исследуя флюидные и расплавные включения в вулканических вмещающих породах. Обе оценки сходятся в том, что главными летучими компонентами в очагах вулканов являются H₂O и CO₂. В составе газов эманаций кислых и средних вулканов резко преобладает H₂O, доля которой составляет более 90 мол % (Scailet, Pichavant, 2003). Доля H₂O во флюидной фазе непосредственно перед извержением по оценке этих авторов меньше (> 60 мол %). Кроме воды и углекислоты в составах вулканических эманаций зна-

чимую роль играют соединения серы, хлора и фтора (Wallace, 2005). Исследования расплавных включений во вкрапленниках из туфов и пемз крупных извержений показывают, что непосредственно перед извержением магмы были обогащены летучими компонентами, в некоторых случаях даже насыщены на разных этапах эволюции очага. В то же время оценки, сделанные для вулканических эманаций и состава флюидов непосредственно перед извержениями, часто сильно расходятся. Это связано, в первую очередь, с тем, что разные компоненты могут иметь различные источники и вести себя по-разному в ходе эволюции системы магматических камер, питающих вулканы. Информации о том, как летучие ведут себя в очагах кислых магм непосредственно перед крупными и катастрофическими эксплозивными извержениями в современной литературе мало и она сильно разрознена. В данной работе мы рассмотрим вопросы, связанные с поведением летучих компонентов на примере дацитов кальдерных извержений острова Итуруп, расположенного в южной части Большой Курильской гряды (БКГ).

Геология кальдер острова Итуруп. На южных островах БКГ встречаются обширные поля пемзово-пирокластических отложений плейстоцен-голоценового возраста. На

острове Итуруп они расположены в его северной и южной частях (рис. 1). На юге они связаны с образованием кальдеры Львиная Пасть, размером 7×8 км (Новейший и современный вулканизм..., 2005; Дегтерев и др., 2015; Смирнов и др., 2017). Объем изверженного материала по разным оценкам составляет 70 и 170 км³ (Мелекесцев и др., 1988; Новейший и современный вулканизм..., 2005; Базанова и др., 2016). Пемзово-пирокластические отложения в северной части острова занимают низменный перешеек Ветровой. Перешеек представляет собой узкий грабен шириной 12 км, пересекающий остров в меридианальном направлении (рис. 1). Сам грабен и заполняющие его пирокластические отложения прослеживаются в акваторию Охотского моря. Мнения относительно центра извержения расходятся. В настоящее время считается, что центром извержения является кальдера диаметром около 6 км, расположенная в центральной части перешейка (Горшков, 1967). Однако высказывается также мнение, что центром извержения должна быть более крупная кальдера, расположенная в районе залива Простор Охотского моря (Авдейко и др., 1992). Объем изверженного материала оценивается около 100 км³ (Мелекесцев и др., 1988).

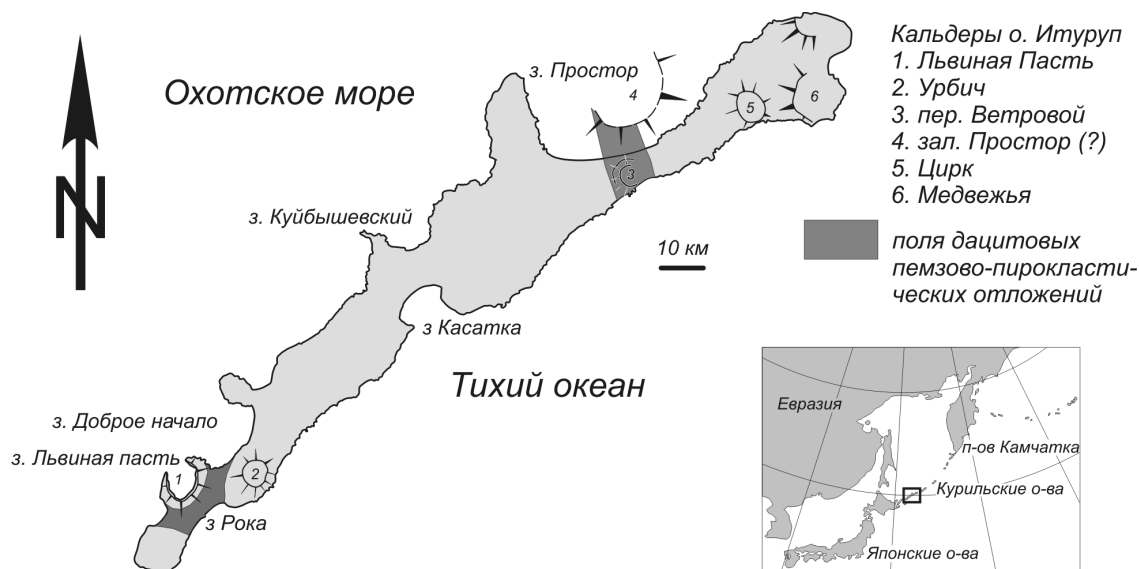


Рис. 1 Расположение кальдер и позднплейстоцен-голоценовых пемзово-пирокластических отложений крупных кальдерных извержений острова Итуруп.

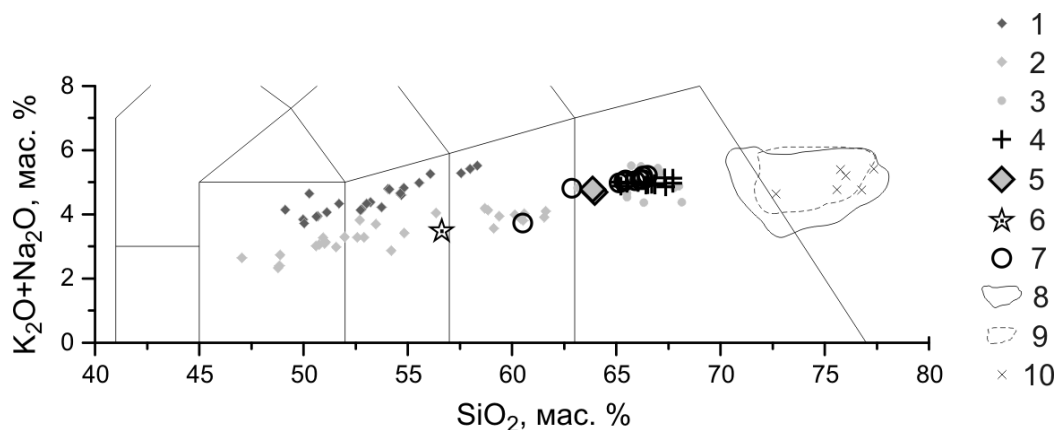


Рис. 2 Составы вулканических пород острова Итуруп. 1 – породы, отвечающие тыловой части дуги; 2 – породы, отвечающие фронтальной части дуги; 3 – дациты Курильских островов; 4 – пемзы перешейка Ветрового; 5 – экструзии перешейка Ветрового; 6 – андезибазальт вулкана Клуба; 7 – пемзы кальдеры Львиная Пасть; 8 – составы стекол расплавных включений (перешеек Ветрового); 9 – составы стекол расплавных включений (Львиная Пасть); 10 – составы стекла основной массы пемз перешейка Ветрового.

Предполагается, что имели место два эпизода извержения кислой пирокластики из кальдеры Львиная Пасть: около 13,0 тыс. лет и около 12,3 тыс. лет (^{14}C) (Дегтярев и др., 2015). По другим данным пирокластические породы датируются 9,5 тыс лет (^{14}C) (Базанова и др., 2016). Точное датирование извержения пемз перешейка Ветрового не проводилось. Но опираясь на отсутствие признаков ледниковой эрозии, возраст подстилающих отложений (около 43 тыс. лет) и перекрывающих отложений морских террас можно считать, что время извержения близко к границе плейстоцена и голоцена.

Петрография и минералогия пемз. Пемзы обоих извержений имеют одинаковый дацитовый состав (рис. 2). В качестве вкрапленников в пемзах обоих извержений присутствуют авгит, гиперстен, плагиоклаз, кварц, ильменит и магнетит, погруженные в стекловатую основную массу. Стекло имеет риолитовый состав (рис. 2). В виде включений в ассоциациях присутствует апатит и сульфиды. В отличие от пемз перешейка Ветрового, в пемзах отложений кальдеры Львиная Пасть в качестве вкрапленников встречается амфибол, имеющий состав магнезиальной роговой обманки. Несмотря на то, что среди вкрапленников в пемзах перешейка Ветрового амфибол отсутствует, он был обнаружен в виде включений в пироксенах. При этом гиперстен захватывает амфибол в виде кристаллических включений, а авгит замещает амфибол и содержит его реликты. Составы включений амфибола варьируют в широких пределах от магнезиальной роговой обманки до чермакита.

Для плагиоклазов обоих извержений характерна сложная зональность. Ранние плагиоклазы имеют пятнистое строение, в то время как поздние – концентрически-зональное. Зональность по составу отличается монотонностью. Наиболее ранний плагиоклаз отвечает андезину, затем происходит резкое повышение основности вплоть до лабрадора и даже анортита, и затем постепенное ее снижение снова до состава андезина. Составы андезинов перешейка Ветровой и Львиной Пасты близки, в то время как основные плагиоклазы различаются. В пемзах Ветрового плагиоклазы достигают An_{95} , в то время как в пемзах Львиной Пасты – не более An_{85} .

Несмотря на высокие номера плагиоклазов и магнезиальность темноцветных минералов исследование расплавных включений в них показало, что извержения связаны с эволюцией очагов низкокальциевых плагиориолитовых и плагиориодацитовых расплавов в окислительных условиях (Смирнов и др., 2016, 2017). Признаков участия базитовых расплавов в образовании вкрапленников темноцветных минералов установлено не было. На основе детальных исследований минералов и включений минералообразующих сред в минералах пемз перешейка Ветрового было сделано предположение, что образование риолитового расплава связано с частичным дегидратационным плавлением метабазитов острова Итуруп, а кристаллизация темноцветных минералов является результатом перитектической реакции разложения амфибола, сохранившегося в виде реликтов и кристаллических включений в пироксенах, в очаге кислой магмы (Смирнов и др., 2016, 2017) в окислительной обстановке. Амфибол пемз Львиной Пасты является признаком того, что образование и последующая эволюция риолитового расплава происходили при более высоких давлениях.

Летучие в очагах дацитовых магмы крупных кальдерных извержений острова Итуруп. Повышение основности плагиоклаза в ходе эволюции риолитового расплава без участия более основных магм может быть объяснено вариациями давления летучих в очаге (Panjasawatwong et al., 1995). Стекла природно-закаленных расплавных включений в разных

минералах содержат от 2 до 6 мас. % H_2O (рис. 3). Наиболее высокие ее содержания отмечены для расплавных включений в плагиоклазах и темноцветных минералах. В плагиоклазе из пемз перешейка Ветрового были обнаружены флюидные углекислотно-водные включения, содержащие сильно разбавленные водные растворы. На основании термометрических данных молярное отношение $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ оценено около 0,91 в пересчете на систему $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$. Плотность гомогенного флюида составляла примерно 0,12 г/см³. Учитывая это, расчетное флюидное давление при дегазации магмы должно было быть около 0,64 кбар. Исходя из состава флюида и параметров кристаллизации расплава в очаге перешейка Ветрового количество CO_2 в расплаве можно оценить около 20 – 100 ppm, используя модель (Papale et al., 2006). Опираясь на эти данные и используя модель (Papale et al., 2006) давления насыщения флюидом для расплавов перешейка Ветрового были оценены в диапазоне от 0,4 до 1,9 кбар. Большая часть значений попадает в интервал 1,0 – 1,2 кбар.

Рост парциального давления воды происходил в очагах обоих извержений, но в случае Львиной Пасты это привело к образованию водосодержащего минерала – амфибола, включения которого встречаются, главным образом, в концентрически-зональном плагиоклазе. В очаге перешейка Ветрового образование амфибола оказалось невозможным, но на определенном этапе произошла дегазация магмы. Это явление совпало с образованием наиболее основных участков в кристаллах плагиоклаза. Опираясь на характер распределения флюидных включений в плагиоклазе, можно сделать заключение, что рост давления воды и дегазация способствовали замещению раннего среднего плагиоклаза и стабилизировали плагиоклаз более основного состава вплоть до завершения флюидоотделения. Дегазация завершилась до катастрофического извержения и непосредственно перед ним признаки дегазации магмы не фиксируются.

Содержания серы в расплавных включениях определялись методом рентгеноспектрального анализа, и не превысили предел обнаружения 0,021 мас. % в пересчете на SO_3 . Однако наличие в минеральных ассоциациях включений сульфидов (пирротин, пирит и неидентифицированные сульфиды Cu и Fe) и высокие содержания серы до 0,82 мас. % SO_3 в апатите Ветрового и до 0,95 мас. % SO_3 в апатите Львиной Пасты свидетельствуют о значительной роли серосодержащих соединений в очагах обоих извержений.

Методом Рамановской спектроскопии установить наличие соединений серы в газовой фазе флюидных включений не удалось, однако анализ зерен кварца методом газовой хромато-масс-спектрометрии показал, что газовая фаза расплавных включений содержит небольшие количества SO_2 и серосодержащих углеводородов: тиофенов и диметилди-сульфида. Содержания сероводорода крайне незначительные. Опираясь на соотношение площадей аналитических линий воды и SO_2 можно предположить, что количество SO_2 составляет не более 0,05 от количества воды во флюиде и, таким образом, может быть соизмеримо с количеством CO_2 . Из этого следует, что некоторая доля серосодержащих соединений может транспортироваться в составе водного флюида, выделившегося при дегазации магмы перешейка Ветрового.

Подобно другим магмам надсубдукционных обстановок риолитовые расплавы обоих вулканических центров обогащены хлором (рис. 4). Концентрации хлора в стеклах расплавных включений находятся в диапазоне 0,2 – 0,4 мас. %, при средних концентрациях 0,25 и 0,26 соответственно. Известно, что хлор является элементом, чувствительным к дегазации магмы, так как перераспределяется преимущественно в водный флюид (Webster et al., 1999)

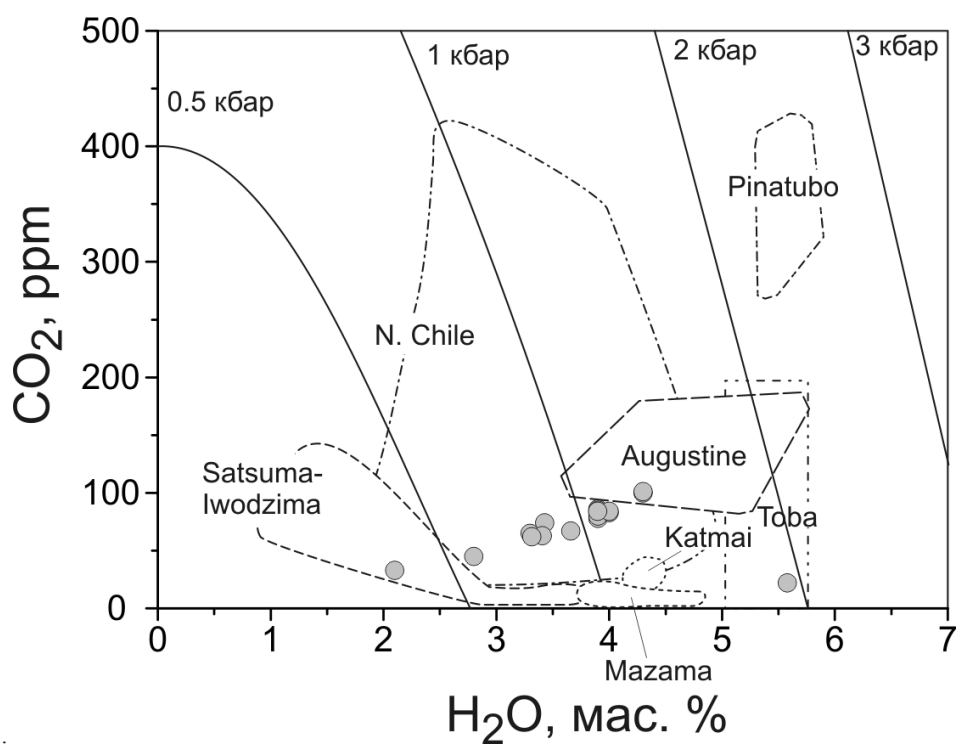


Рис. 3 Измеренные содержания H_2O (Раман, SIMS) и расчетные концентрации CO_2 в расплавах извержения перешейка Ветрового (серые кружки). Изобары взаимной растворимости H_2O и CO_2 и поля расплавов крупномасштабных извержений кислой магмы по (Wallace, 2005).

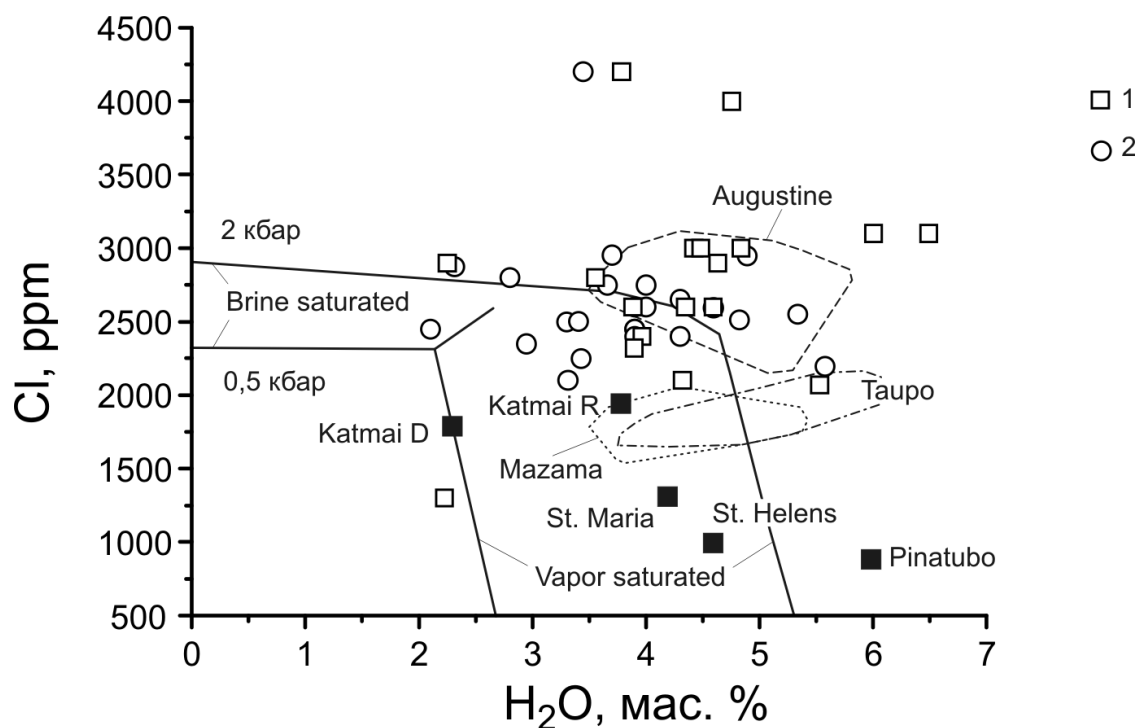


Рис. 4. Вариации содержаний воды и хлора в риолитовых расплавах извержений кальдеры Львиная Пасть (1) и перешейка Ветрового (2). Поля расплавов крупномасштабных извержений кислой магмы по (Wallace, 2005). Изобары насыщения водно-хлоридным флюидом по (Webster et al., 1999)

Эксперименты с гаплогранитными составами расплавов показывают, что при давлении 1 кбар и концентрации хлора в расплаве около 0,25 мас. %, выделяющийся флюид должен быть близок к состоянию водного рассола. Однако данные микротермометрии флюидных включений во вкрапленниках перешейка Ветрового противоречат этому заключению. Это может быть связано с тем, что расплавы имели не гаплогранитный, а плагиориолитовый состав. Другой причиной может быть кристаллизация другой хлорсодержащей фазы одновременно с выделением флюида. Такой фазой в продуктах обоих извержений является апатит, содержание хлора в котором может достигать 1,75 мас. %. Другим минералом, концентратом хлора, является амфибол. Амфиболы перешейка Ветрового содержали в среднем 0,1 мас. % Cl. В некоторых анализах его содержание могло достигать 0,17 мас. %. Однако, принимая во внимание, что амфибол был нестабилен и вероятнее всего замещался клинопироксеном, его ролью в перераспределении хлора при эволюции риолитовой магмы можно пренебречь.

С помощью газовой хромато-масс-спектрометрии в составе газовой фазы расплавных включений в кварце удалось установить присутствие хлорсодержащих органических соединений, относящихся к эфирам, кетонам и хлорзамещенным аминам.

Из полученных данных следует, что даже несмотря на дегазацию расплава, хлор в магме перешейка Ветрового в значительной степени перераспределялся между расплавом и апатитом. Вероятно, с флюидной фазой удалялась незначительная часть хлора.

В отличие от перешейка Ветрового магма кальдеры Львиная Пасть не дегазировала в ходе кристаллизации минералов вкрапленников. Вместо выделения водного флюида происходила кристаллизация магнезиальной роговой обманки. В среднем содержания хлора в ней близки к содержаниям хлора в реликтовом амфиболе Ветрового и составляют 0,1 мас. %, а максимальные значения достигают 0,13 мас. %. Из этого следует, что в ходе эволюции очага, хлор перераспределялся между расплавом, апатитом и амфиболом.

Содержание фтора в риолитовых расплавах обоих вулканических центров находится на одинаковом уровне и по данным вторично-ионной масс-спектрометрии составляет около 0,05 мас. %. Эти величины сопоставимы с содержаниями, определёнными для надсубдукционных высококальциевых риолитов туфов Бишоп, Калифорния, США (Anderson et al., 2000), но существенно ниже концентраций фтора в расплавах риолитов кальдеры Пикабо (Йеллустоун, США) (до 1,45 мас. % F), в образовании которой принимали участие магмы, образовавшиеся под воздействием мантийного плюма (Drew et al., 2016). Минералом концентратом фтора в магмах перешейка Ветрового и кальдеры Львиная Пасть является апатит. Апатит из пемз кальдеры Львиная Пасть несколько обеднен фтором (в среднем 1,91 мас. % F), в то время как апатит перешейка Ветрового обогащен им (в среднем 2,37 мас. % F). Сопоставляя содержания фтора и хлора, видно, что в обоих случаях апатит относится к фтор-апатитам с высокими содержаниями серы и хлора. Очевидно, что в очагах обоих кальдерных извержений фтор перераспределялся преимущественно в апатит.

На основании данных газовой хромато-масс-спектрометрии есть основание полагать, что некоторая доля фтора транспортируется флюидной фазой при дегазации.

Заключение. Различия в поведении воды при кристаллизации расплавов перешейка Ветрового и кальдеры Львиная Пасть позволяют считать, что становление очагов этих вулканических центров происходило на различных глубинах.

Вероятно, глубина залегания очага кальдерного извержения перешейка Ветрового отвечала давлениям около 1 кбар (около 3 км). Это нижний предел стабильности амфибола (Beard, Lofgren, 1991) при температурах около 850°C, которые были определены методами минералотермометрии. Насыщение расплава водой при этих давлениях привело к образованию избыточного количества воды, выделившейся в виде флюида. Давление при этом могло снижаться до 0,6 кбар и возможно ниже, но затем восстанавливалось и стабилизировалось на уровне 1 кбар. В составе флюидной фазы помимо воды присутствовали значимые, но небольшие, количества CO₂ и SO₂, а также фтор и хлорсодержащие органические соединения.

Очаг кальдеры Львиная Пасть находился на большей глубине, отвечающей давлениям более 1 кбар. По этой причине дегазации расплава не происходило, а насыщение водой выразилось в кристаллизации роговой обманки. В обоих случаях кристаллизация минералов происходила в окислительной обстановке. Фугитивность кислорода для пемз перешейка Ветрового оценивается на уровне NNO+2.

Низкие температуры и давления (830-870°C и 0,8-2,0 кбар) магматических очагов не способствовали растворению углекислоты в расплавах перешейка Ветрового, и она выделялась совместно с водой при дегазации. Признаков дегазации углекислоты из очага кальдеры Львиная Пасть перед катастрофическим извержением зафиксировать не удалось. Следует отметить, что наиболее вероятным механизмом насыщения расплавов углекислотой является дегазация глубинных магм, так как плавящиеся породы земной коры острова не могут давать значительного количества углекислоты. Влияние глубинных базитовых магм на эволюцию очага кальдеры Львиная Пасть подтверждается наличием в туфах инородного материала, отвечающего оливин-плагиоклазовым базальтам. В туфах и пемзах перешейка Ветрового такой материал обнаружен не был, но посткальдерные образования представлены андезибазальтовым стратовулканом Клуба и дацитовыми экструзиями более основного, чем туфы, состава (рис. 2). Таким образом, для обоих вулканических центров следует предполагать взаимодействие с глубинными магмами, которые могли послужить источником углекислоты и серы (Wallace, 2005).

Несмотря на низкую концентрацию серы в расплавах обоих вулканических центров, минеральные ассоциации содержат заметное количество сульфидов и сульфатсодержащего апатита. В плагиоклазе кальдеры Львиная Пасть были обнаружены кристаллические включения ангидрита. Все это говорит о существенной роли серы в магматическом процессе. Сера могла поступать в магму как в процессе плавления субстрата, претерпевшего гидротермальную переработку, так и за счет дегазации очагов основной магмы. Растворимость серы в риолитовом расплаве при низких температурах и давлениях низка и ее поступление, по-видимому, приводило к осаждению сульфидов, обогащению апатита серой и кристаллизации ангидрита. При дегазации часть серы могла удаляться из очага в виде сернистого газа и серосодержащих органических соединений.

Расплавы обоих вулканических центров были обогащены хлором. Содержания, измеренные в стеклах расплавных включений, близки к максимальным из известных. Эти содержания близки к насыщению расплава водными рассолами (Webster et al., 1999). Однако при дегазации магмы перешейка Ветрового хлор оставался связанным в расплаве, и часть его фиксировалась в апатите. Следует ожидать, что часть хлора могла удаляться с флюидной фазой при дегазации, но так как вариации концентраций хлора в РВ в различ-

ных минералах перешейка Ветрового незначительны, можно предположить, что эта часть была также незначительной. Роль концентратора хлора в магмах кальдеры Львиная Пасть также играли силикатный расплав, апатит и роговая обманка.

Проведенные исследования позволяют расширить наши представления о режиме летучих компонентов в малоглубинных очагах кислой магмы в островных дугах. Поведение воды и углекислоты главным образом определяется давлением и возможностью проявления процессов дегазации. Сера, количество которой в поверхностных эманациях современных вулканов достаточно велико, вероятнее всего при кристаллизации кислой магмы остается в значительной степени в минеральных формах. Фтор и хлор перераспределяются между расплавом и кристаллизующимися из него минералами. Расположение флюидных включений в плагиоклазе перешейка Ветрового и отсутствие их в плагиоклазе кальдеры Львиная Пасть позволяют считать, что катастрофические извержения не предварялись дегазацией расплава. Она происходила непосредственно в ходе извержения. Ранняя дегазация магматического очага перешейка Ветрового может быть обусловлена пересыщением расплава водой, выделяющейся при термическом разложении водосодержащих минералов плавящегося субстрата.

Работа выполнена в рамках проектов 0330-2016-0005 и 0330-2016-0001 госзадания ИГМ СО РАН и при поддержке гранта РФФИ 16-05-00894. Аналитические исследования выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Список литературы

1. Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волинец О.Н. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. М.: Наука, 1992, 528 с.
2. Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Дирксен О.В., Дирксен В.Г. Вулканические катастрофы позднего плейстоцена–голоцена на Камчатке и Курильских островах. Часть 1. Типы и классы катастрофических извержений – главных компонентов вулканического катастрофизма // Вулканология и сейсмология. 2016, №3, С. 3-21
3. Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги, М.: Наука, 1967, 287 с
4. Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Арсланов Х.А., Коротеев И.Г., Гурьянов В.Б., Козлов Д.Н., Чибисова М.В. Катастрофические эксплозивные извержения Львиной Пасты (о. Итуруп): Стратиграфия и геохронология // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. Всероссийская конференция. Южно-Сахалинск, 26-30 мая 2015. Сборник материалов. Т.2. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 210-213
5. Смирнов С.З., Соколова Е.Н., Рыбин А.В., Кузьмин Д.В., Тимина Т.В., Максимович И.А., Котов А.А., Бефус А.И., Шевко А.Я., Низаметдинов И.Р., Дегтерев А.В. // Петрология магматических и метаморфических формаций. Вып. 8. Материалы Всероссийской петрографической конференции с международным участием. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2016, С. 338-344.
6. Смирнов С.З., Рыбин А.В., Соколова Е.Н., Кузьмин Д.В., Дегтерев А.В., Тимина Т.Ю. Кислые магмы кальдерных извержений острова Итуруп: первые результаты исследования расплавных включений во вкрапленниках пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветровой // Тихоокеанская геология, 2017, т. 36, №1, с. 50-68
7. 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.
8. Новейший и современный вулканизм на территории России [Лаверов Н.П., отв. ред.]. 2005. М.:Наука. 604 с.
9. Anderson A.T., Davis A.M., Lu F.Q. Evolution of Bishop Tuff rhyolitic magma based on melt and magnetite inclusions and zoned phenocrysts // Journal of Petrology. 2000. 41. 3. 449-473.
10. Beard J.S., Lofgren G.E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites // Journal of Petrology. 1991. V. 32. Part 2. P. 365-401.
11. Bryan S.E., Peate I.U., Peate D.W., Self S., Jerram D.A., Mawby M.R., Marsh J.S., Miller J.A. The largest volcanic eruptions on Earth // Earth-Science Reviews. 2010. V. 102. P. 207-229.
12. Drew D.L., Bindeman I., Loewen M.W., Wallace P.J. Initiation of large-volume silicic centers in the Yellowstone hotspot track: insights from H₂O- and F-rich quartz-hosted melt inclusions in Arbon Valley Tuff of the Snake River Plain // Contrib. Mineral. Petrol, 2016, 171, #10
13. 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 // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1995. 118. 4. 420-432.
14. Papale P, Moretti R, Barbato D. The compositional dependence of the saturation surface of H₂O + CO₂ fluids in silicate melts // Chemical Geology. 2006. V. 229. P. 78-95.
15. Scaillet B, Pichavant M. Experimental constraints on volatile abundances in arc magmas and their implications for degassing processes // In: Volcanic Degassing. Geological Society, London, Special Publications—Oppenheimer C, Pyle DM, Barclay J, eds. 2003, 213:23–52.
16. Wallace P.J. Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data // J. Volcan. Geotherm. Res, 2005, 140, P. 217-240.
17. Webster, J.D., Kinzler, R.J., Mathez, E.A. Chloride and water solubility in basalt and andesite melts and implications for magmatic degassing // Geochim. Cosmochim. Acta 1999. V.63, P. 729– 738.