МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЙ УНИВЕРСИТЕТ

Петрология магматических и метаморфических комплексов

Выпуск 8

Материалы Всероссийской конференции
с международным участием

29 ноября – 2 декабря 2016 года

Томск 2016

Природа островодужных дацитов на примере пемз крупного кальдерного извержения перешейка Ветровой (О-в Итуруп, Курильские острова)

Смирнов С.З.[1,2], Соколова Е.Н.[1,2,3], Рыбин А.В.[4], Кузьмин Д.В.[1,3], Тимина Т.В.[1], Максимович И.А.[3], Котов А.А.[3], Бефус А.И.[3], Шевко А.Я.[1], Низаметдинов И.Р.[1,3], Дегтерев А.В.[4]

[1] Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, ssmr@igm.nsc.ru, [2] Томский государственный университет, Томск; [3] Новосибирский государственный университет, Новосибирск; [4] Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

The nature of island-arc dacites: case study of pumices of the Vetrovoy isthmus large-volume caldera eruption (Iturup Island, Kurile Islands)

Smirnov S.Z., Sokolova E.N., Rybin A.V., Kuzmin D.V., Timina T.Yu., Maksimovich I.A., Kotov A.A., Befus A.I., Shevko A. Ya., Nizametdinov I.R., Degterev A.V.

Siliceous magmatic rocks are less abundant than basaltic or andesitic one in the island-arc environments. Meanwhile they are important because manifest the growth of island-arc continental-type crust. Moreover, silicic magmatism is tightly connected with hydrothermal ore formation and catastrophic eruptions with strong climatic impacts. The siliceous island-arc magmas are believed to be either a differentiation product of the more basic (basaltic or andesitic) magma, or result of partial melting of the island-arc crust. On the basis of rock and mineral chemistry, and fluid and melt inclusion study we demonstrate that Vetrovoy Isthmus tuffs and pumices at the north of the Iturup Island (Kurile Islands) have originated from voluminous (~100 km^3) eruption of the dacitic magma. This magma was generated by partial melting probably due to intrusion of the hot deep magma into greenshist metabasites of the crust. The composition of melts corresponded to H_2O-saturated (up to 6 wt. %) tholeiitic meta- to peraluminious rhyodacite-rhyolites with normal alkalinity and low- to moderate K_2O contents. Pumice phenocrysts correspond to two paragenesises: 'gabbro-noritic' (two Mg-rich pyroxenes and An-rich plagioclase) and quartz-plagioclase. The 'gabbro-noritic' paragenesis is a result of peritectic reaction, occurring on partial melting, while the quartz-plagioclase one have crystallized directly from rhyodacite-rhyolitic melt. Dacitic pumice composition is a result of eruption of mixture containing siliceous melts and reactional mafic minerals.

Введение. Кислые вулканиты в составе Курильской островодужной ассоциации играют подчиненную роль по сравнению с основными и средними. Количество кислого материала среди вулканических и интрузивных образований закономерно увеличивается с севера на юг (Рыбин, 1997; Авдейко и др., 1992). Дациты и риолиты Курильских островов, образованные в четвертичном периоде, приурочены к гомодромно развивающимся вулканическим центрам. Они появляются либо в тесной связи с непрерывными андезибазальтовыми и андезитовыми сериями, либо сопряжены с заключительными стадиями эволюции вулканов – кальдерообразованием и посткальдерной экструзивной деятельностью. Пемзово-пирокластические отложения, связанные с крупномасштабными кальдерными извержениями, широко распространены в курильском секторе Курило-Камчатской островной дуги (Горшков, 1967; Грабков, 1973, Федорченко и др., 1989), однако, по сравнению с кальдерами полуострова Камчатка, им уделялось недостаточно внимания, особенно в части петрологических исследований. Несмотря на то, что проявления кислого вулканизма в островодужных обстановках – явление более редкое, по сравнению с базитовыми и андезитовыми, именно они являются отражением процессов формированием коры континентального типа. Кроме этого с ними связано активное рудообразование и эксплозивные извержения, имеющие катастрофические последствия и влияющие на климат в регионе.

Низменный перешеек Ветровой (ПВ) в северной части острова Итуруп в структурном плане является грабеном, ограниченным субмеридиональными разломами, шириной около 12 км (*рис. 1*). Пемзовый пирокластический материал и продукты его разрушения слагают практически весь перешеек Ветровой. В центральной части перешейка выделяются остатки крупной кальдерной постройки диаметром 6-7 км (Горшков, 1967). Средняя высота по гребню соммы около 180 м, максимальная - 264 м. В южной части кальдеры, на тихоокеанском побережье, расположена цепочка синкальдерных экструзивных куполов дацитового состава, наиболее крупные из них слагают мысы Евгения и Канакова. Посткальдерная деятельность связана с образованием пемзово-пирокластического конуса высотой около 200 м в западной части кальдеры, маара озера Тайное диаметром около 0.7 км в северной части атрио и андезибазальтового стратовулкана Клумба, высотой 164,6 м.

По оценке И.В. Мелекесцева (Мелекесцев и др., 1988) объем изверженных пород кальдеры Перешейка Ветровой (ПВ) составляет около 100 км^3. Таким образом, по объему изверженного материала это извержение стоит в одном ряду с такими известными событиями Курило-Камчатской дуги как образование кальдер: Узон (39

тыс. л. ^{14}C; 150 км^3) (Базанова и др., 2016); озера Курильское (7,6 тыс. лет; 140-170 км^3) и вулкана Горелый (361 тыс. лет; 120 км^3) (Bindeman et al., 2010). Возраст пемзы ПВ из средней части разреза по данным термолюминесцентного анализа около 20000 лет. В определенной степени эти данные подтверждаются результатами радиоуглеродного датирования органики из толщи отложений, подстилающих пирокластику ПВ, возраст которой составляет 42967±633 л.н. (ГИН-7094) (Булгаков, 1994). Таким образом, кальдера перешейка Ветровой является проявлением одного из крупнейших эксплозивных событий Курило-Камчатской островной дуги, произошедшим на рубеже плейстоцена и голоцена.

Минералогия и петрография дацитов. Пемзово-пирокластические отложения представлены туфами и туффитами с обломками пемз, достигающими размеров до 40 см в поперечнике. Они слагают непрерывные толщи, мощность которых вблизи центра извержения превышает 260 м. В обнаженной части разреза отсутствуют горизонты палеопочв, что позволяет предположить, что туфовые отложения сформировались в ходе единого, либо серии близодновременных извержений плинийского типа.

Пемзы представляют собой белые и серые породы с высокой пористостью. Они сложены прозрачным бесцветным стеклом с большим количеством порфировых вкрапленников, размер которых достигает 1 мм. Среди кристаллических образований часто встречаются гломеропорфировые сростки. Вкрапленники, представлены гиперстеном, диопсид-авгитом, плагиоклазом, кварцем, ильменитом и магнетитом (Смирнов и др., 2017). Гломеропорфировые сростки сложены преимущественно плагиоклазом. В качестве второстепенных минералов в них присутствуют клино- и ортопироксены и оксиды Fe и Ti. Все эти минералы также образуют включения друг в друге.

Для темноцветных минералов (*рис. 2а*) характерна повышенная магнезиальность. Mg# клинопироксенов варьирует от 71 до 76, а ортопироксена – от 62 до 69. Вкрапленники этих минералов часто обладают хорошо выраженными кристаллографическими формами и лишены контрастной зональности по составу. Среди ассоциации порфировых вкрапленников пироксены составляют первые проценты. Амфибол отсутствует среди темноцветных вкрапленников, но, в редких случаях его включения были установлены в некоторых вкрапленниках пироксена. Детальное исследование позволило обнаружить специфические ортопироксен-магнетитовые мирмекитовые срастания, в ядерной части одного из которых присутствуют реликты оливина Fo_{72}, природа которых требует объяснения.

Плагиоклазы (*рис. 2б*) наиболее распространенные минералы дацитов ПВ. Их составы варьируют в широких пределах от An_{41} до An_{95}. В отличие от темноцветов плагиоклазы обладают четкой и сложной зональностью. Центральные части вкрапленников имеют, как правило, пятнистое строение и их состав изменяется от An_{40} до An_{85}. Они содержат обильные включения клинопироксена, магнетита и ильменита. Ортопироксен практически не встречается. Промежуточные и внешние зоны обладают концентрической зональностью. Промежуточные зоны имеют наиболее основные составы. Содержание An в них достигает 95 мол. % и монотонно снижается к периферии до An_{45}. Количество включений других минералов в этих зонах значительно меньше, чем в ядерной части. Среди них становится меньше клинопироксена и увеличивается доля ортопироксена. Появляется апатит, присутствуют магнетит и ильменит. Внешние зоны вкрапленников плагиоклаза часто не содержат кристаллических включений. Таким образом, в ассоциации вкрапленников в дацитовых пемзах ПВ присутствует парагенезис двух магнезиальных пироксенов и основного плагиоклаза. Он назван нами «габбро-норитовым». Такой парагенезис предполагает кристаллизацию из расплавов основного состава. Его наличие в породах кислого состава часто считается признаком внедрения более основных магм в кислый очаг.

Количество вкрапленников кварца в дацитах существенно больше, чем темноцветов, но значительно меньше, чем плагиоклаза. Кварц не образует сростков с другими минералами и не встречается в виде включений в них. Он сам также не содержит включений других минералов. Кварц встречается в виде одиночных, хорошо образованных или частично резорбированных кристаллов. Исследования методом катодолюминесценции не выявили отчетливой ростовой зональности.

Пемзы перешейка Ветровой по составу отвечают умеренно-глиноземистым дацитам (*рис. 3а, б*). Их составы попадают в область характерную для кислых пород Курило-Камчатской островодужной системы. По соотношению щелочей и извести породы являются известковыми, и по содержанию калия попадают на границу низко и умеренно калиевых (*рис. 3в*). Породы соответствуют известково-щелочной серии, однако их составы находятся в непосредственной близости от границы между известково-щелочными и толеитовыми. Стекло основной массы пемз имеет риолитовый состав. По содержанию и соотношению щелочей и извести оно соответствует валовому составу породы. Однако отличается от вала высокой глиноземистостью и железистостью. По соотношению нормативных полевых шпатов валовый состав дацитовых пемз ПВ попадает в тоналитовую область пород ТТГ серии (*рис. 3г*), в то время как стекло основной массы, отвечает трондьемитовому составу.

Распределение РЗЭ в составах породах характеризуется низким $(La/Yb)_N$ отношением (1,2) и проявленным Eu минимумом (*рис. 4а*), что типично для пород ТТГ серии. В распределении концентраций редких и рассеянных элементов, нормированных на примитивную мантию, проявляются глубокие минимумы по Ta, Nb и Ti и отчетливый максимум по LILE (*рис. 4б*).

Флюидные и расплавные включения. Все минералы парагенезиса содержат многочисленные первичные расплавные (РВ) включения. Многие РВ при комнатной температуре содержат только силикатное стекло. РВ в пироксенах иногда содержат усадочный пузырек и минерал-узник (апатит) (*рис. 5а, б*).

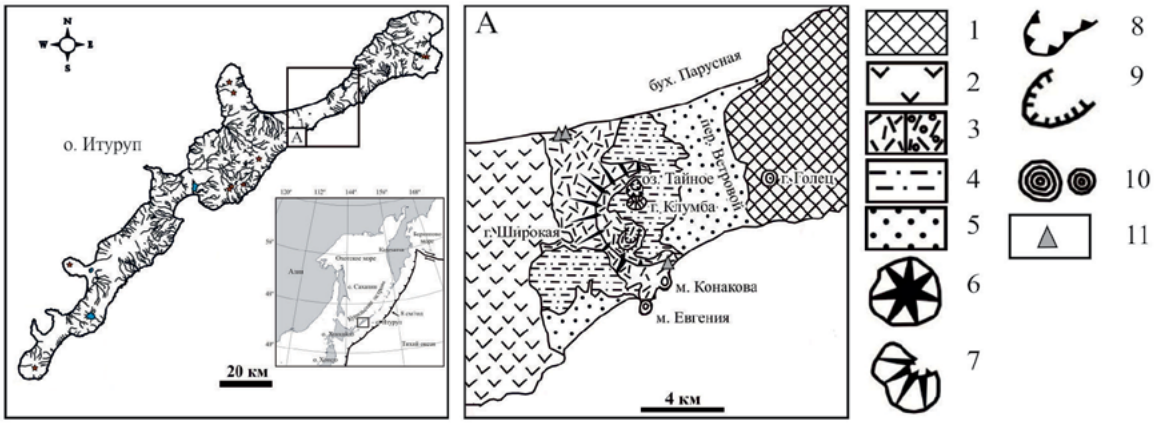


Рис. 1. Геолого-геоморфологические особенности кальдеры перешейка Ветрового на острове Итуруп по (Смирнов и др., 2017) с изменениями: 1 – фундамент; 2 – эффузивы четвертичных вулканов; 3 – пирокластические отложения: существенно пемзовые (а) и с примесью окатанных обломков эффузивов (б); 4 – отложения высокой морской террасы; 5 – отложения низкой морской террасы и пляжей; 6 – вулканические постройки; 7 – вулканические постройки сильно расчлененные; 8 – уступы кальдер; 9 - эрозионные уступы; 10 – экструзивные купола; 11 – точки отбора образцов.

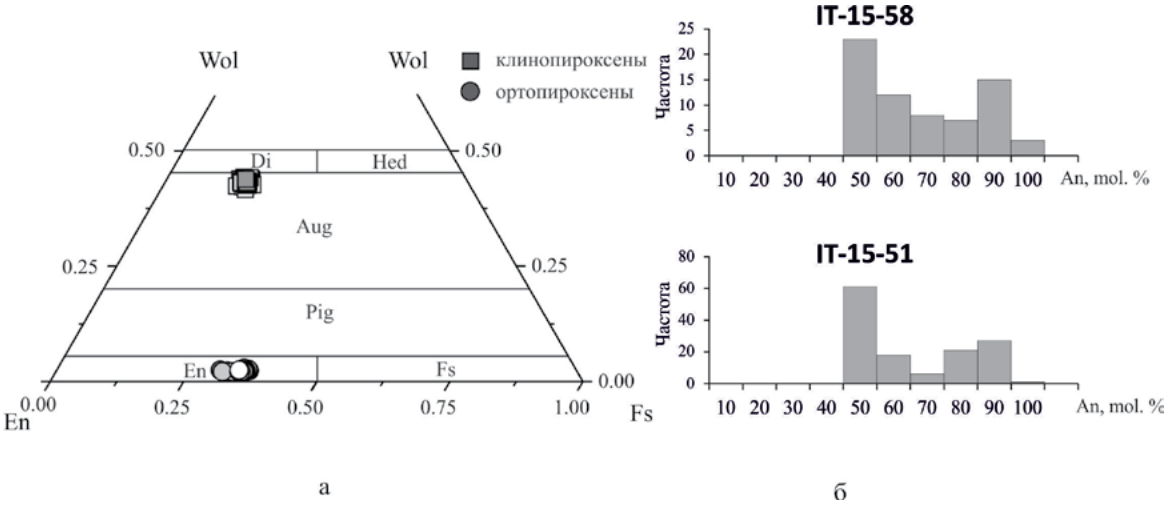


Рис. 2. Составы вкрапленников пироксенов (а) и плагиоклаза (б) из пемз перешейка Ветрового. На рис. 2а разной заливкой показаны данные для разных образцов. На рис. 2б образец IT-15-51 соответствует нижним частям разреза, а IT-15-58 – средним.

В ядерных частях вкрапленников плагиоклаза содержатся многочисленные сингенетичные флюидные (ФВ) и расплавные (РВ) включения (*рис. 5в*). В плагиоклазе с пятнистым и концентрически-зональным строением ФВ встречаются только в зонах и участках с высоким содержанием An. Во внешних зонах роста содержатся только РВ. РВ в плагиоклазе чаще, чем в пироксенах содержат газовые пузырьки. ФВ двухфазовые при комнатной температуре и содержат малоплотную CO_2 и жидкий водный раствор. Температура плавления льда в жидкой части включений составляет -1…-2°С, что свидетельствует о низкой концентрации растворенных солей. ФВ гомогенизируются в газ в диапазоне 370 – 380°С.

Так как кристаллические фазы в РВ можно считать результатом захвата сингенетичных минеральных фаз, а газовые пузырьки являются либо результатом захвата сосуществующей газовой фазы (плагиоклаз), либо результатом усадки при закалке (пироксены и кварц), можно считать, что состав стекол РВ соответствует составу минералообразующего расплава.

Составы стекол РВ во всех минералах близки друг к другу и соответствуют риолитам и риодацитам нормального ряда (*рис. 3а*). Включения в пироксенах и большинстве плагиоклазов обладают широкими вариациями глиноземистости (*рис. 3б*), изменяясь от высоко- до умеренноглиноземистых. При этом в среднем глиноземистость включений в плагиоклазе ниже, чем в пироксенах. РВ в кварце обладают наиболее низкой глиноземистостью по сравнению с включениями в плагиоклазе и пироксенах. В целом глиноземистость включений выше, чем у пород. Стекла РВ отличаются от валового состава дацитов более высокой железистостью, но близки по содержаниям щелочей и извести. В этом отношении они полностью соответствуют стеклу основной массы.

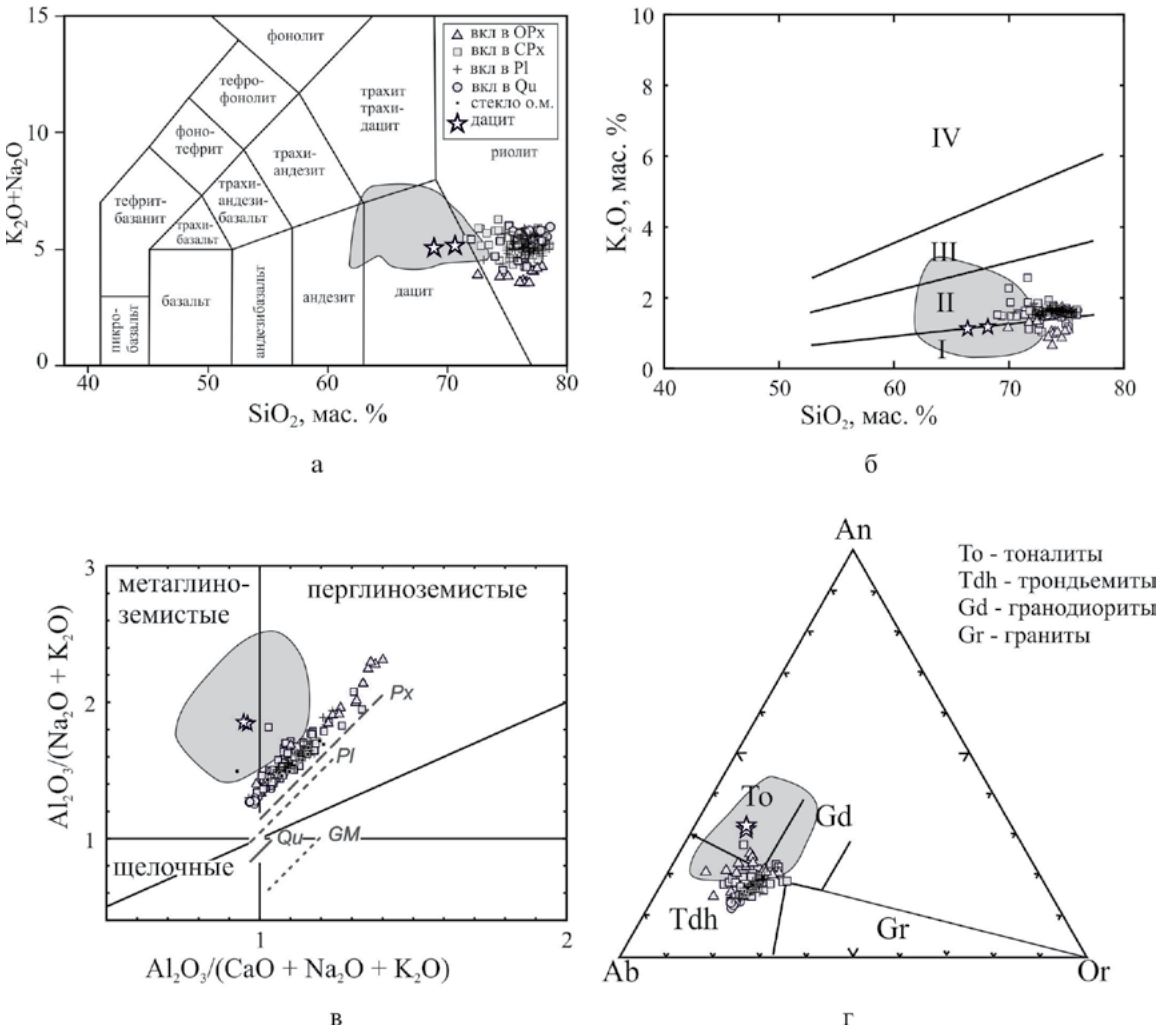


Рис. 3. Составы дацитов перешейка Ветровой, стекол основной массы и стекол расплавных включений во вкрапленниках. Серое поле – составы дацитов Курило-Камчатской островодужной системы.

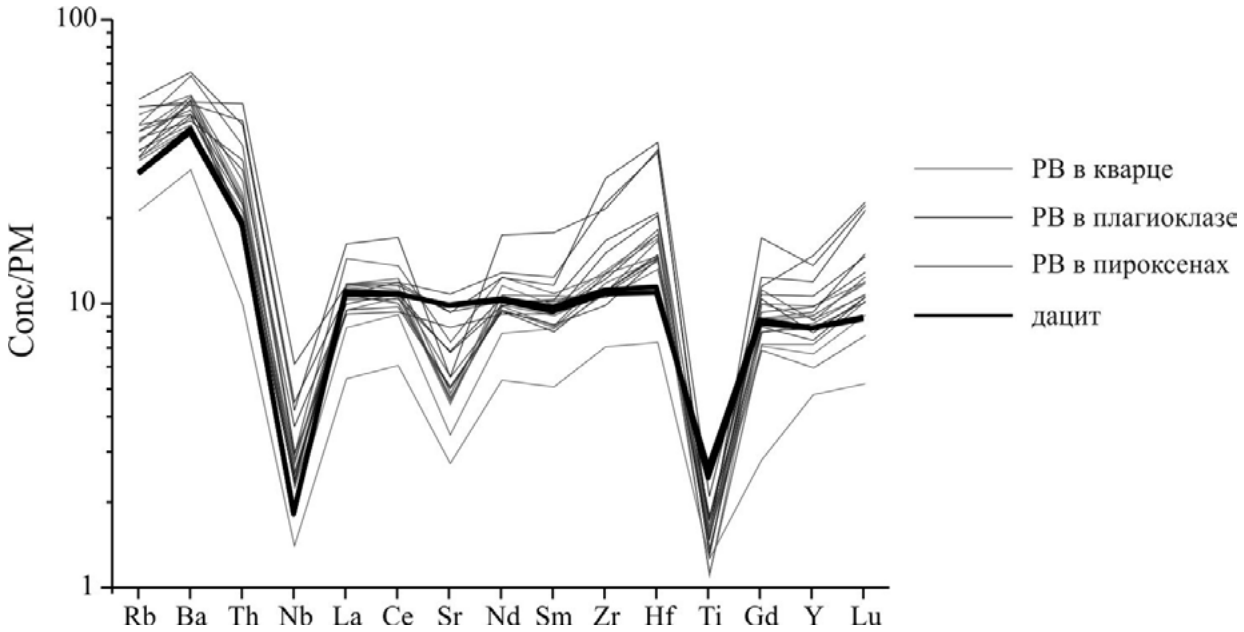


Рис. 4. Характер распределения РЗЭ (а), редких и рассеянных (б) элементов в составах дацитов и стекол РВ в разных минералах.

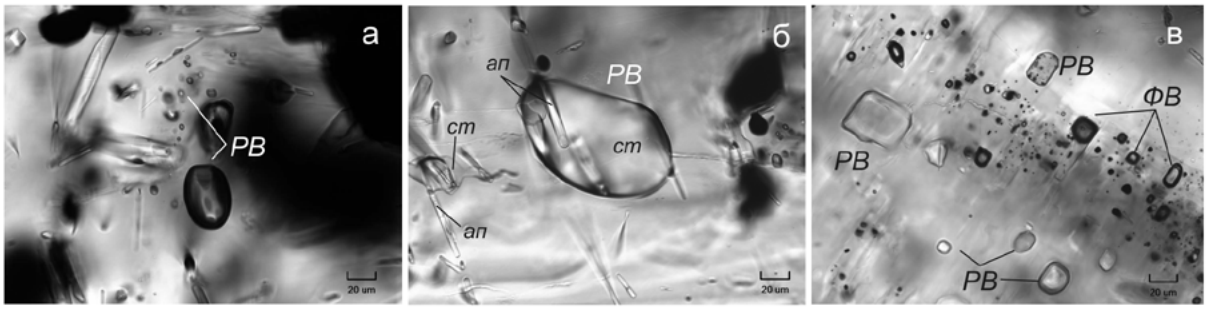


Рис. 5. Включения минералообразующих сред в пироксенах (а, б) и плагиоклазе (в): РВ – расплавные включения; ФВ – флюидные включения; ап – апатит; ст – стекло.

Стекла РВ несколько обогащены РЗЭ по отношению к валу породы (*рис. 4а*). Спектры распределения их концентраций характеризуются слабым обогащением HREE. Видно, что по концентрациям и характеру распределения РЗЭ РВ в разных минералах практически не отличаются друг от друга. Характер распределения и концентрации редких и рассеянных элементов также мало отличаются для стекол РВ в разных минералах. Характер распределения их концентраций в целом похож на валовый состав породы, но отличается проявлением обогащения по Zr и Hf и отчетливой отрицательной Sr аномалией (*рис. 4б*).

Опираясь на составы апатита и стекол расплавных включений можно утверждать, что главными летучими компонентами в расплавах, участвовавших в извержениях ПВ, были H_2O, CO_2 и соединения хлора, фтора и серы. Прямые измерения концентраций воды в стеклах РВ методами вторично-ионной масс-спектрометрии и рамановской спектроскопии показали, что они варьируют в значительных пределах. В стеклах РВ в пироксенах они находятся в пределах 3,3 – 5,6 мас. %, в плагиоклазах – около 4,5 – 4,8 мас. %. Наиболее значительные вариации характерны для РВ в кварце, где концентрации воды изменяются от 2 до 6 мас. %. Большинство измеренных значений концентраций находится в диапазоне 4 – 6 мас. %. В стеклах основной массы содержание воды в среднем ниже, чем в стеклах РВ. Содержание хлора в РВ варьирует от 0,19 – 0,27 мас. %. Содержания сернистых соединений в стеклах не превышают предела обнаружения 0,021 мас. % в пересчете на SO_3. Содержания фтора по данным SIMS составили 0,03 – 0,09 мас. %. Несмотря на обилие апатита в виде включений в пироксенах и плагиоклазе, содержания фосфора в стеклах РВ оказались низкими в пределах 0,018 – 0,027 мас. % P_2O_5. Содержания летучих в апатитах составляют 0,15 – 0,82 мас. % SO_3, 1,67 – 1,76 мас. % Cl и 2,11 – 3,00 мас. % F. С учетом коэффициентов распределения фтора между апатитом и кислым расплавом по (Webster et al., 2009) его содержание в расплавах ПВ можно оценить в 0,2 мас.%, что существенно больше измеренных значений.

Обсуждение результатов. Пемзы ПВ являются результатом крупномасштабного извержения или серии близодновременных извержений плинийского типа большой мощности. Минералого-петрографические исследования позволяют сделать заключение, что в составе ассоциации вкрапленников присутствует два, вероятно разновременных парагенезиса: «габбро-норитовый» в который входят два пироксена, плагиоклаз, апатит, магнетит и ильменит и кварц-плагиоклазовый. «Габбро-норитовый» парагенезис является наиболее ранним. Для объяснений появления подобных парагенезисов в составе дацитов обычно полагают, что образование темноцветов связано с кристаллизацией более основной магмы. В этом случае считают, что исходная магма была андезитовой или базальтовой. Возможно также, что образование дацитов связано с контаминацией основной магмой, внедряющейся в кислый очаг. Наши исследования показали, что кристаллизация «габбро-норитового» парагенезиса происходила из умеренно-глиноземистого риолитового и риодацитового расплава, состав которого подобен гранитоидам островодужных ТТГ серий с высоким (до 6 мас. %) содержанием воды. Отсутствие зональности в темноцветных минералах и которая могла бы говорить об их кристаллизации из контрастных по составу магм, наличие включений риолитовых и риодацитовых расплавов как в ядерных так и в периферийных частях вкрапленников не подтверждают связи их образования с расплавами андезитового или базальтового состава.

В отличие от пироксенов плагиоклаз характеризуется сложной зональностью. Состав плагиоклаза изменяется от средних составов в ядерных частях к основным в промежуточных и вновь к средним на периферии. Характер срастаний и ассоциаций кристаллических, флюидных и расплавных включений в плагиоклазе позволяет утверждать, что на ранних стадиях процесса этот парагенезис уже содержит средний плагиоклаз. Наличие плагиоклаза в рестите подтверждается обеднением расплавов Sr по сравнению с валовым составом породы. Средний плагиоклаз рестита, по-видимому, замещается основным, который растет из кислого расплава в присутствии водно-углекислотного флюида и объясняется не изменением состава расплава, а возрастанием парциального давления воды в расплаве (Pletchov, Gerya, 1998; Panjasawatwong et al., 1995; Sisson, Grove, 1993; Beard, Lofgren, 1990). Дегазация очага завершается на этой стадии роста вкрапленников плагиоклаза и сопровождается образованием зон с максимальным содержанием An (85-

95 мол. %). Одновременно с образованием наиболее основного плагиоклаза происходит уменьшение доли клинопироксена и увеличение – ортопироксена среди темноцветов. Дальнейшая эволюция риолитового расплава сопровождается кристаллизацией кварц-плагиоклазового парагенезиса, состав плагиоклаза в котором практически монотонно изменяется от An_{95} до An_{45}.

В ходе этого довольно сложного процесса расплав испытывает лишь слабые вариации содержаний главных компонентов, объясняемые кристаллизацией небольшого количества плагиоклаза. Постоянство составов темноцветов и расплава при изменении количественных соотношений между темноцветными минералами означает, что их образование связано с перитектической реакцией. Сходство составов РВ во всех вкрапленниках и стекла основной массы свидетельствуют в пользу того, что РВ отражают состав исходного расплава, не претерпевшего значительной кристаллизационной дифференциации. Из этого следует, что образование расплава произошло незадолго до плинийского извержения. Плоские спектры распределения РЗЭ являются лишним подтверждением этого вывода.

Сопоставление результатов исследования РВ, ФВ и минеральных включений позволяют сделать заключение, что ассоциация двух пироксенов и основного плагиоклаза является результатом перитектической реакции, вероятно, протекающей в области генерации риолитового расплава в результате прогрева коры острова Итуруп. Редкость амфибола предполагает, что процесс протекал при давлениях ≤ 1 кбар. Расчеты с использованием двупироксенового и плагиоклаз-жидкостного термометров (Putirka, 2008) показали, что температура составляла 830-850°С. Потенциал кислорода при кристаллизации «габбро-норитового» парагенезиса отвечал буферу NNO+2 по оксибарометру (Andersen, Lindsley, 1988). Последнее объясняет высокую магнезиальность темноцветов. При высоком потенциале кислорода происходит осаждение железа в виде окислов – магнетита и ильменита, в то время как в силикаты входит преимущественно магний.

Высокие (4 – 6 мас. %) содержания воды в расплавах ПВ возможны, если плавящийся протолит содержит минералы с высокими концентрациями воды, например амфибол или хлориты (Beard, Lofgren, 1990). Насыщение водой расплава на ранней стадии кристаллизации позволяет предположить, что при плавлении только часть воды растворилась в расплаве. Значительное количество осталось в виде флюидной фазы, что предполагает высокое содержание воды в протолите. Таким протолитом наиболее вероятно являлись метабазиты коры острова Итуруп, метаморфизованные в фации зеленых сланцев.

Сам процесс плавления требует внедрения в кору высокотемпературной магмы, которая является источником тепла при плавлении. Под влиянием тепла гипотетического магматического источника будет протекать реакция $Chl+Pl+Qtz+CO_2 \rightarrow An_{50}+CPx+Mgt+Ilm+риолитовый\ расплав+H_2O+CO_2$. Где углекислота может быть продуктом дегазации глубинной магмы. Дегидратация должна иметь настолько большие масштабы, чтобы обеспечить насыщение расплава водным флюидом еще на стадии плавления. Выделение водного флюида и рост флюидного давления приводит к нестабильности клинопироксена и реакции $An_{50}+CPx+Mgt+Ilm+расплав+H_2O+CO_2 \rightarrow An_{80\text{-}90}+Opx+Mgt+Ilm+расплав+H_2O+CO_2$. Тот факт, что в этот момент происходит переход от процесса замещения среднего плагиоклаза основным к концентрическому росту основного плагиоклаза, свидетельствует в пользу того, что дегазация не привела к извержению. Скорее следует предположить рассеивание флюида во вмещающие породы. Метасоматическое преобразование пород рамы могло привести к герметизации очага риолитовой магмы с сохранением содержания воды на уровне насыщения при данном давлении (~ 5 мас. %). Дальнейший прогрев такого очага мог служить спусковым механизмом для мощного плинийского извержения.

Заключение. Пример дацитовых пемз перешейка Ветрового демонстрирует, что возникновение очагов дацитовых магм может быть связано с выплавлением риолитовых расплавов из метабазитов коры под воздействием тепла внедряющихся в нее горячих мантийных магм. В этой ситуации дацитовый состав пород определяется не химизмом выплавившихся расплавов, а тем, что в извержение вовлечены как сами расплавы, так и продукты их кристаллизации и остатки продуктов реакций, протекающих при плавлении.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований №16-05-00894 и гранта ДВО РАН 15-I-2-101. Аналитические исследования выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Литература

1. Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волынец О.Н. и др. 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.В. 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. Булгаков Р.Ф. История развития южных островов Большой Курильской дуги в плейстоцене. Автореферат канд. дисс. Москва, 1994, 20 с.
4. Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги, М.:, Наука, 1967, 287 с.
5. Грабков В.К. Новые данные о геологическом строении о. Итуруп // ДАН СССР, 1973, т. 212, №6, С. 1409-1412.
6. 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.
7. Рыбин А.В. Неоген-четвертичный кислый вулканизм Курильской островной дуги: Автореф. ... дис. канд. геол.-минерал. наук : 04.00.08.- Южно - Сахалинск, 1997.- 24 с.
8. 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 (в печати).
9. Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис, М.: Наука, 1989, 237 с.
10. Andersen, D.J., Lindsley, D.H. Internally consistent solution models for Fe-Mg-Mn-Ti oxides: Fe-Ti oxides // Am Miner., 1988, Vol. 73, pp. 714-726.
11. 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, pp. 365-401.
12. Bindeman, I.N., Leonov, V.L., Izbekov, P.E., Ponomareva, V.V., Watts, K.E., Shipley, N.K., Perepelov, A.B. Bazanova, L.I., Jicha, B.R., Singer, B.S., Schmitt, A.K., Portnyagin, M.V., Chen, C.H. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar–Ar and U–Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // Journal of Volcanology, 2010, Vol. 189, pp. 57-80.
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, // Contrib Mineral Petrol, 1995, Vol. 118, pp. 420–432.
14. Pletchov P.Y., Gerya T.V. Effect of H_2O on plagioclase-melt equilibrium // Experiment in Geosciences, 1998, pp. 7–9.
15. Putirka K., Thermometers and barometers for volcanic systems // in Putirka K. (ed) Minerals, inclusions and volcanic processes. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Vol. 69, 2008, pp. 61-120.
16. Sisson T.W., Grove T.L. Experimental investigations of the role of H2O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism // Contrib. Mineral. Petrol., 1993, Vol. 113, pp.143-166.
17. Webster J.D., Tappen C.M., Mandeville C.W. Partitioning behavior of chlorine and fluorine in the system apatite-melt-fluid. II: Felsic silicate systems at 200 MPa // Geochim. Cosmochim. Acta, 2009, Vol. 73, Iss. 3, pp. 559-581.