

УДК 550.84

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ДЕГАЗАЦИИ ВОДНЫХ МАГМ

© 2008 г. А. П. Максимов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 14.06.2007 г.

На примере двух мощных извержений конуса Квицапу вулкана Сьерро-Ассуль (Чили) рассматривается проблема эффузивных извержений магм с высокими предэруптивными содержаниями летучих. Предложен физико-химический механизм дегазации магм с потерей ими летучих до появления на поверхности. Модель основана на взаимодействии магм, находившихся в разных по глубине очагах, и различии между растворимостью воды в расплаве и ее равновесной концентрацией в протяженном по вертикали магматическом теле. При этом малоглубинный очаг может аккумулировать летучие, выделяющиеся из магмы, поступающей в него из глубинного очага. Дается объяснение резких различий в характере извержений 1846–1847 и 1932 г. при идентичном химико-петрографическом составе магм.

ВВЕДЕНИЕ

Связь андезитовых и более кислых магм с повышенным содержанием в них летучих хорошо известна. Отражением этой связи является высоко-эксплозивный характер вулканических извержений таких магм, а продукты извержений часто представлены пепловой и пемзовой тефрой, и пирокластическими потоками. Плинианский характер извержений является естественным следствием высоких концентраций летучих в магмах перед извержением, т.е. в питающих очагах.

Однако имеются примеры и чисто эффузивных излияний кислых магм. На вулкане Крашенинникова (Камчатка) описаны потоки дацитового состава [6]. Эти потоки отличаются высокой текучестью (при незначительном уклоне местности их длина достигает 13 км, а мощность составляет всего несколько метров) и практически полным отсутствием сопровождающих отложений тефры.

Проблема неэксплозивного кислого вулканизма рассматривалась в [10], где отмечено парадоксальное различие в содержании летучих для коагматических извержений тефры и экструзивных куполов при петрологическом сходстве этих пород. Было предложено два механизма перехода от эксплозивного вулканизма к экструзивному и эффузивному. Согласно первому, такой переход может быть вызван доэруптивным градиентом летучих в магме очага. В этом случае смена характера извержения отражает подъем на поверхность изначально все более бедной летучими магмы. Согласно второму механизму, переход от неэксплозивному извержению является результатом перераспределения летучих в изначально однородной по содержанию летучих магме при ее подъеме к поверхности и сопряженной дегазации.

Особый интерес представляют случаи эффузивных излияний кислых магм с водными минералами. Присутствие таких минералов указывает на высокие доэруптивные содержания воды в расплаве. Последнее обстоятельство должно приводить к высокой эксплозивности, поэтому эффузивный характер подобных извержений требует специального объяснения. Пример такого извержения представляет извержение кратера Квицапу (Чили) в 1846–1847 гг. При этом извержении кратковременный эксплозивный этап выразился в отдельных начальных эксплозиях, за которыми последовало длительное эффузивное излияние большого объема лавы роговообманковых дацитов [12]. Незначительная роль эксплозивного этапа извержения Квицапу 1846–1847 гг. не позволяет объяснить дегазацию столь крупной порции водонасыщенной магмы механизмами, предложенными в [10]. Данная проблема рассматривалась В. Хилдресом и Р. Дрейком [12], но убедительного решения этой проблемы не было найдено. Используя материал, приведенный в указанной работе, в данной статье предлагается возможная модель доэруптивной дегазации, позволяющая объяснить эффузивный характер излияния изначально богатых летучими магм.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КОНУСА КВИЦАПУ

Квицапу – это небольшой побочный конус на склоне стратовулкана Сьерро-Ассуль, Чили. Ниже приводятся краткие сведения о вулкане Сьерро-Ассуль, характеристика извержений конуса Квицапу и их продуктов, детально описанные в работе [12].

Вулкан Сьерро-Ассуль с конусом Квицапу расположен в пределах сложной вулканической группы. Кроме двух крупных стратовулканов в эту вул-

каническую группу входят многочисленные голоценовые и позднеплейстоценовые центры извержений шлаков и лав от основных до риодацитовых составов. Однако в историческое время (со времени поселения здесь европейцев в начале XVI столетия) в этом районе не отмечалось ни эруптивной, ни фумарольной активности вплоть до 1846 г. В основании этой вулканической группы залегает мощный древний гранодиоритовый интрузив. Постройка вулкана Сьерро-Ассуль сложена спектром пород от базальтов до пироксеновых дацитов (51–69% SiO₂). До первого извержения Квицапу в 1846–1847 гг. амфибол в породах вулкана отсутствовал. Самый молодой до извержения Квицапу лавовый поток представлен низкокристаллическими безроговообманковыми риодацитами (69.2% SiO₂).

Образование конуса Квицапу связано с двумя гигантскими извержениями. Первое извержение происходило в 1846–1847 гг. За исключением очень короткого начального этапа, это извержение было практически чисто эффузивным. В ходе его излилось 5 км³ лавы роговообманковых дацитов. В дальнейшем, на несколько десятилетий вулкан перешел в состояние покоя.

С 1907 по 1932 гг. имела место эруптивная активность, в начале слабая, затем все более интенсивная, когда наблюдались пепловые колонны более 4 км высотой, а ночью сильное свечение. В этот период и был сформирован собственно конус Квицапу.

В апреле 1932 г. из кратера Квицапу произошло мощное эксплозивное извержение 9.5 км³ пемзы. Согласно разным оценкам высота эруптивной колонны менялась от 10 до 30 км. Длительность плиннианской фазы составила около 18 ч. Через 7–10 дней эруптивная деятельность практически прекратилась. Спустя две недели после плиннианской активности в 6–7 км к северу от Квицапу на склоне стратовулкана Дескабеадо-Гранде началась фумарольная деятельность. Это было первое в историческое время проявление активности на этом вулкане. Кроме того, в июне на северном склоне Дескабеадо-Гранде возник новый кратер шириной 600 м, который до 1933 г. проявлял слабую до умеренной эпизодическую эксплозивную активность. В результате отложился слой резургентных отложений без ювенильных компонентов. После 1933 г. извержений не было.

Продукты извержений 1846 и 1932 гг. В ходе извержений конуса Квицапу 1846 и 1932 гг. было извергнуто соответственно ~5 и 4 км³ магмы роговообманковых дацитов (в пересчете на плотную породу). До извержения вулкана Хадсон в 1991 г. это были крупнейшие в историческое время извержения в Южной Америке.

Породы извержения 1846–1847 гг. представлены исключительно лавами, пеплы не обнаружены. Это роговообманково-гиперстен-плагиоклазовые дациты с редким клинопироксеном и содержанием SiO₂ 67–68%. В лавовых потоках широко распространены

магматические включения от основного до среднего состава с вкрапленниками оливина и плагиоклаза, обычно с закаленными границами. Лавы 1846 г. были первыми на вулкане Сьерро-Ассуль, содержащими роговую обманку.

Более 95% (а возможно 98%) пород извержения 1932 г. составляют такие же по минералогическому и химическому (~68% SiO₂) составу дациты, однако началось и закончилось извержение 1932 г. выбросами оливинсодержащих черных шлаков. Шлаки представлены андезитовыми бомбами и дацит – андезитовыми полосчатыми пемзами. Тонкий слой андезитовой и полосчатой пемзы прослеживается также среди плиннианских дацитов. Количество кремнеземов в анализах исходного шлака находятся в интервале 52–63% SiO₂. Другой ювенильный компонент – вспененные риодацитовые пемзы 69–70% SiO₂ составляют <0.5% отложений, но присутствуют повсеместно. Среди резургентных обломков, помимо лав 1846–1847 гг. и редких представителей более старых пород Сьерро-Ассуль, присутствуют породы гранодиоритового интрузива, изредка частично оплавленные.

Дациты описанных извержений конуса укладываются в узкий интервал кислотности – 67–68 % SiO₂. Особенностью извержения 1932 г. является чрезвычайно широкий интервал составов его продуктов: от базальтов до риодацитов (52–70 % SiO₂), при резко преобладающем развитии кислых дацитов. Широкий интервал составов этого извержения говорит о взаимодействии основной (базальтовой) и кислой (дацитовой) магм, выразившемся в их физическом и отчасти химическом смешении. Основные и средние по составу магматические включения в лавах 1846–1847 гг. также свидетельствуют о взаимодействии дацитовой магмы с более основной. Это подтверждается линейным трендом вариаций петрогенных окислов в зависимости от кремнекислотности для продуктов двух извержений [12]. В породах извержения 1932 г., имеющих <63% SiO₂, роговая обманка, как правило, отсутствует.

По минералогическому, химическому, геохимическому и изотопному составам дациты обоих извержений практически идентичны. Составы и количество фенокристаллов (15–19%) почти неразличимы для дацитов двух извержений. Роговые обманки в дацитах 1932 г. и в закаленных стекловатых частях лав 1846–1847 гг. не имеют опацитовых каемок. Предэруптивные температуры и окислительно-восстановительный режим магм, рассчитанные по составам сосуществующих титаномагнетит-ильменитовых пар, для лав 1846–1847 гг. и пемз 1932 г. аналогичны. Для андезитовых шлаков начальной стадии извержения 1932 г. получены более низкие значения температур и летучести кислорода. Единственное существенное различие между дацитами 1846–1847 и 1932 гг. наблюдается в изотопных отношениях водорода для соответствующих роговых

обманок. Несомненно, обе дацитовые магмы извергнуты из одного резервуара. Однако первое извержение было эффузивным, а второе – взрывным, плинианским.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ("ЗАГАДКА КВИЦАПУ")

Среди вышеизложенных особенностей вулканической активности кратера Квицапу прежде всего обращают на себя внимание следующие:

1) резко различный характер извержений в 1846–1847 и 1932 гг. при идентичности химизма и минералогии их продуктов, а также близости объемов;

2) практически эффузивный способ извержения в 1846–1847 гг. на фоне высокой кислотности пород и наличия в них вкрапленников неизменной роговой обманки.

Из последней особенности вытекает интересная физико-химическая проблема, сформулированная в работе [12]: *"Каким образом 5 км³ роговообманковой дацитовой магмы 1846–1847 гг. могли дегазировать пассивно?"*

Прежде чем перейти к изложению предлагаемого нами решения данной проблемы, следует более детально рассмотреть ее физико-химические аспекты. Такой анализ был проделан в указанной выше работе, и он приводится ниже вместе с нашими дополнениями.

На основании экспериментальных данных [15–17] авторы отметили, что наличие свежих (равновесных) фенокристаллов роговой обманки говорит о высоком содержании воды в расплавах на глубине, не менее 4–5 вес. %. В то же время, содержание воды в дацитах 1846–1847 гг. составляет всего 0,1–0,3%. Отсюда следует, что из магмы выделилось не менее 500 млн. т воды, что соответствует 0,5 км³ жидкой воды. Загадка не только в том, почему извержение носило эффузивный, а не взрывной характер, но и в том, куда исчезла эта вода, поскольку, вплоть до начала взрывной активности в 1907 г., не было отмечено ни активной fumarольной деятельности, ни горячих источников.

Таким образом, эффузивный характер первого извержения предполагает доэруптивную дегазацию дацитовой магмы. Вывод о том, что дацитовая магма извержения Квицапу 1846–1847 гг. в значительной степени дегазировала в глубинной обстановке, получен также на основании анализа изотопии водорода в продуктах двух извержений [12].

Магма дацитов 1932 г., напротив, испытала резкую приповерхностную и поверхностную дегазацию, которая и выразилась в плинианском характере извержения. Доля воды, оставшаяся в этих породах, заметно выше, чем в аналогичных дацитах 1846–1847 гг., и составляет в среднем 0,74%. То есть, в обоих случаях, даже при неполной дегазации расплавов, первоначальное содержание воды в них

были более чем достаточно для катастрофического взрывного извержения, но в первом случае потеря летучих произошла совершенно другим образом, скорее всего, на глубине.

В [12], при ведущей роли декомпрессии в дегазации дацитовой магмы, допускается некоторое влияние на этот процесс разогрева и сопутствующей конвекции под действием более горячей мафической магмы, поступившей в кислый очаг из глубины. Основание для такого предположения дают закаленные мафические включения, рассеянные в дацитах 1846–1847 гг. Однако фактический материал говорит против какой-либо заметной роли нагрева магмы в ее дегазации. Во-первых, предэруптивные температуры кристаллизации дацитов 1846–1847 гг. практически не превышают таковые для дацитов 1932 г. и охватывают даже более низкие значения. Во-вторых, дациты данных извержений имеют одинаковый набор фенокристаллов и одинаковую их долю. Следует заметить, что наличие среди них роговой обманки, которая имеет максимальную температуру стабильности в дацитах примерно 950°C [14, 15, 18], резко ограничивает существенный разогрев магмы. Кроме того, при наличии кристаллов нагрев магмы вызывает их плавление с соответствующим увеличением доли расплава и может привести только к дополнительному растворению воды (летучих). Само по себе влияние температуры на растворимость воды в расплавах невелико. Более значительную роль могли бы сыграть охлаждение и сопутствующая кристаллизация. Однако и этот механизм следует отвергнуть по указанным выше причинам. Очевидно, что температурный режим для дацитовых магм обоих извержений был аналогичен, и вариации температуры не могут объяснить различия в характере извержений, а дегазация вызвана декомпрессией магмы при подъеме из очага.

Предположение, что большая часть воды выделилась из дацитовой магмы 1846–1847 гг. во время длительного медленного подъема к поверхности [12], плохо согласуется с экспериментальными данными о стабильности роговой обманки и скорости ее распада при низких давлениях [15–17]. При подъеме на глубины менее ~4 км водонасыщенная дацитовая магма с температурой 860°C должна неизбежно дегазировать, а амфибол – разрушаться. Так как в закаленных участках лав 1846–1847 гг. на роговой обманке не наблюдаются опацитовые каймы, то, согласно экспериментам по скорости образования опацитовых каемок на роговой обманке [16], время подъема магмы из области стабильности амфибола на поверхность и соответственно время отделения ~4,5% воды, вероятно не превышает нескольких суток. Даже если в природной обстановке скорость распада роговой обманки сдерживается дополнительными факторами по сравнению с условиями в экспериментах, попытка объяснить доэруптивную дегазацию за счет медленного продвижения передо-

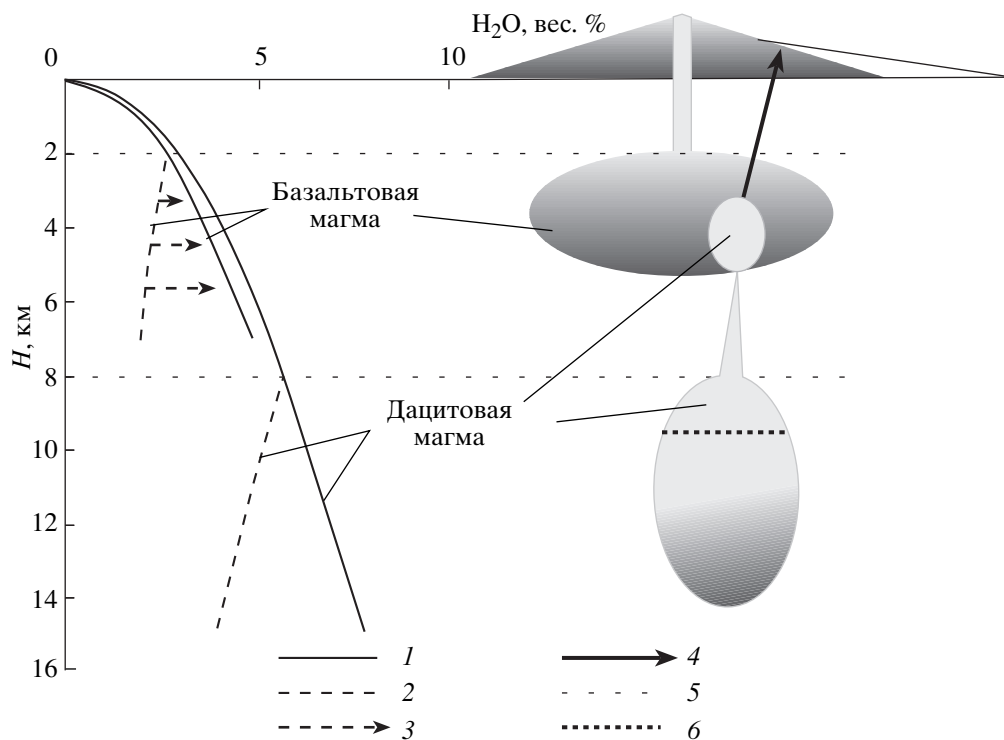


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая модель глубинной дегазации магмы. Слева на графике глубина (H , км) – концентрация воды (H_2O , вес. %) показаны: 1 – кривые растворимости воды в расплаве базальта и дацита (рассчитаны по модели растворимости согласно [8, 13]); 2 – примерное положение кривых равновесного распределения воды по глубине очага в базальтовом и дацитовом расплавах; 3 – направление эволюции содержания воды в приповерхностном очаге при прохождении через него дегазирующей магмы из более глубокого очага. Справа – модельное представление системы питания извержения конуса Квицапу 1846–1847 гг.; 4 – направление движения дацитовой магмы к поверхности; 5 – схематическое положение кровли очагов по глубине; 6 – условная нижняя граница дацитовой магмы в нижнем очаге.

вой порции магмы 1846 г. к поверхности не приемлема, поскольку ничего не меняет по существу.

Следует обратить внимание еще на одну особенность активности Квицапу, а именно: длительную, умеренную по масштабу, эксплозивную деятельность в период с 1907 по 1931 гг. В [12] деятельность вулкана в этот период рассматривается, в основном как фреатическая или иногда фумарольная, а связанные с ней пеплы авторы считают преимущественно резургентными. Однако из приводимого ими описания следует, что это далеко не так. Наличие слоев черных шлаков в разрезах кратера, активное свечение, многолетняя устойчивая активность вулканского типа с пепловыми колоннами более 4 км – все говорит о преимущественно магматическом вулcano- Stromboli-анском характере активности. Кроме того, этот период непосредственно предшествовал одному из крупнейших плинианских извержений в Андах в XX в.

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ДЕГАЗАЦИИ

Помимо ответа на основной вопрос о механизме доэруптивной дегазации, модель должна объяснять еще комплекс фактов:

- 1) широкий спектр составов ювенильных продуктов извержения 1932 г.;
- 2) отсутствие амфибола в продуктах доисторической активности вулкана Сьерро-Ассуль и в более основных разностях выбросов 1932 г.;
- 3) наличие периода длительной умеренной эксплозивной активности спустя несколько десятилетий после первого извержения Квицапу;
- 4) хорошую сохранность роговой обманки в продуктах плинианских извержений Квицапу.

По нашему мнению, “загадку Квицапу” можно объяснить только существованием под вулканом двух разноглубинных магматических очагов (рис. 1). Верхний очаг должен располагаться на глубинах первых километров, там, где амфибол не стабилен в расплавах при любых температурах и концентрациях воды. Этот очаг являлся питающим для вулкана Сьерро-Ассуль в период пред-Квицапу, поскольку в породах постройки вулкана, включая последний риодацитовый поток, амфибол отсутствует. Так как собственно вулкан Сьерро-Ассуль сложен спектром пород от базальтов до риодацитов, то, вероятно, этот очаг был зонален по составу. По-видимому, перед извержениями Квицапу нижние и средние горизонты очага имели базальтовый и андезито-базаль-

товый состав, а верхние – андезитовый, судя по составам включений 1846–1847 гг. и шлаков 1932 г. Как отмечено выше, во включениях и шлаках амфибол также отсутствует. Следует подчеркнуть, что отсутствие роговой обманки вызвано именно низкими давлениями, а не малыми концентрациями воды в магмах. Даже при изначально небольших долях воды, присущих основным магмам, если кристаллизационная дифференциация доходит до дацитов и риодацитов, в магме накапливается достаточное количество воды, но при низких давлениях большая часть этой воды не может раствориться в расплаве и переходит во флюидную фазу.

Источником дацитов 1846–1847 и 1932 гг. являлся более глубокий очаг. Минимальная глубина, на которой могла находиться дацитовая магма перед этими извержениями, определяется минимальным давлением, при котором роговая обманка может кристаллизоваться из расплава. Этот минимум по давлению определяется точкой пересечения кривой стабильности амфибола с кривой солидуса. По разным экспериментальным данным [3, 14–18] амфибол устойчив в расплавах от андезитовых до риолитовых при давлениях более $\sim 1 \pm 0.5$ кбар, т.е. на глубинах $> 2\text{--}4.5$ км. Однако кристаллизация роговой обманки в природных магмах протекает при температурах существенно выше солидуса, т.к. доля вкрапленников в породах с амфиболом, как правило, составляет не более 30–40%. В дацитах Квицапу доля вкрапленников не превышает 20%. Соответственно, минимальное давление, при котором происходила кристаллизация пород с амфиболом, увеличивается до 2–3 кбар (что соответствует глубинам $\sim 6\text{--}9$ км). Вероятно, нижний очаг также испытал глубокую кристаллизационную дифференциацию в закрытых условиях с накоплением в расплаве воды на фоне его охлаждения. Такая эволюция очага привела к формированию кислой роговообманковой дацитовой магмы на верхних горизонтах очага и риодацитовой магмы непосредственно в его кровле, тогда как ниже находились более основные магмы. Физико-химическая модель подобной эволюции представлена в работе [3]. Длительной закрытости этого очага и глубокой дифференциации расплава способствовало его положение на значительной глубине, а также длительный период покоя вулкана. Поступление же мантийных расплавов в питающую систему вулкана, вероятно, давно прекратилось. В пользу такого предположения говорит как широкое развитие андезитов, дацитов и риолитов среди продуктов Сьерро-Асуль – Квицапу, так и длительность периода покоя. Геологическим подтверждением достаточно глубокого положения дацитовой магмы до извержения является наличие в дацитах 1932 г. ксенолитов мощного древнего гранодиоритового массива, залегающего в основании всей вулканической группы.

После продолжительного периода покоя магматическая активность возобновилась, по-видимому,

когда давление летучих в нижнем очаге превысило прочность вышележащих пород. Пересыщенная летучими дацитовая магма на своем восходящем пути из верхних горизонтов глубинного очага к поверхности попала в приповерхностный очаг, преимущественно заполненный более основной магмой.

Здесь следует обратить внимание на три обстоятельства. Во-первых, из-за резкой разницы в вязкостях кислой и более основной магмы они не могли эффективно смешиваться в течение относительно короткого периода продвижения дацитовой магмы к поверхности. Происходило лишь ограниченное физическое вмешивание основной магмы в кислую и отчасти их химическое смешение, результатом которого было образование полосчатых пемз и шлаков основного и среднего состава. В этом случае кислая магма, ввиду ее более низкой плотности, должна была всплывать сквозь базальтовую. Во-вторых, ввиду пересыщенности кислой магмы летучими, она испытывала непрерывную дегазацию в ходе декомпрессии по мере продвижения к поверхности. На небольших глубинах верхнего очага процесс продвижения дацитовой магмы к поверхности постепенно приобретал лавинообразный характер, поскольку здесь начало играть роль увеличение объема и уменьшение плотности дегазирующей кислой магмы. Это приводило к ускорению процесса всплытия. То, что значительную часть пути до поверхности магма продвигалась не по узкой дайке или каналу, а всплывала в относительно свободном пространстве маловязкой базальтовой магмы, возможно, оказалось дополнительным фактором быстрого достижения поверхности и соответственно прекрасной сохранности амфибола. В-третьих, магма в верхнем очаге, за исключением его кровли, не была насыщена летучими, что вытекает из требования термодинамического равновесия. Последнее обстоятельство представляет физико-химическую основу предлагаемой модели.

Как было показано целым рядом авторов [2, 4, 7], согласно требованию термодинамического равновесия, в протяженном по вертикали магматическом теле концентрация летучих, в том числе воды, играющей среди них основную роль, должна убывать с глубиной. Реальное распределение летучих в очаге зависит также и от многих других факторов, в частности наличия в нем конвекции, ее скорости, поступления глубинного вещества, истории динамики очага, распределения температур и т.д. Тем не менее, для длительного стабильного существования очага концентрация летучих должна убывать с глубиной и, следовательно, на его нижних горизонтах быть существенно ниже, чем следует из кривой растворимости. Это схематически иллюстрируется на рис. 1, где показаны кривые растворимости воды в базальтовом и дацитовом расплавах, рассчитанные по модели Бернема [8, 13], и примерное положение кривых равновесного распределения воды по глубине магматической колонны. Точный расчет кривых равно-

весного распределения затруднен из-за отсутствия необходимых данных о структурных единицах расплава и их термодинамических свойствах.

Учитывая, что длительный период вулкан находился в состоянии покоя, в кровле верхнего очага должна была непрерывно происходить кристаллизация. Соответственно, в магме верхней приконтактной области очага происходило накопление воды, и здесь достигалось насыщение расплава летучими. С глубиной концентрация воды убывала (согласно требованию термодинамического равновесия и из-за низкой скорости диффузии воды в расплаве), и разница между растворимостью воды и ее равновесной концентрацией все более возрастала (рис. 1).

Дацитовая магма, находясь в верхней части более глубокого очага, по тем же причинам достигала насыщения или была близка к нему. Подтверждением этому служит наличие вкрапленников близликвидусного амфибола. Так как растворимость воды в расплаве с глубиной возрастает, то дацитовая магма изначально была значительно богаче водой, чем магма верхнего очага, особенно в его нижних горизонтах. При подъеме к поверхности дацитовая магма активно дегазирует. Когда она попадает в ненасыщенные водой нижние горизонты верхнего очага, дальнейшее продвижение кислой магмы сквозь основную неизбежно должно сопровождаться растворением летучих в основной магме, пока не будет достигнуто насыщение последней. На рис. 1 это схематически отражено стрелками, направленными от кривой равновесного распределения к кривой насыщения. Таким образом, верхний очаг может служить своеобразной “ловушкой” для выделяющихся летучих.

Представленная выше схема относится к процессу первого исторического извержения 1846–1847 гг., т.е. к первому прохождению порции кислой магмы через верхний очаг. При этом с дацитовой магмой было вынесено некоторое количество более основных магм, судя по широкой распространенности включений основного и среднего состава в лавах этого извержения.

В результате глубинной дегазации и излияния на поверхность большого объема магмы движущие силы эруптивного процесса на время были исчерпаны, и на несколько десятилетий вулкан перешел в состояние покоя. В этот период верхний очаг уже не содержал свободных летучих (газовой фазы), но количество растворенной в его расплаве воды значительно превысило равновесное ее содержание. Это избыточное количество воды и явилось скрытой пружиной умеренной эксплозивной активности, наблюдавшейся в 1907–1931 гг. Сброс воды мог происходить за счет двух процессов: 1) путем направленной вверх диффузии; 2) в результате конвективного движения глубинных порций магмы к кровле очага. Последний процесс мог быть спровоцирован снижением плотности расплава при растворении в

нем воды. Из-за низкой скорости диффузии, либо умеренной скорости конвекции эксплозивный процесс проявился не сразу и был растянут во времени, причем отчетливо проявилось постепенное нарастание его мощности во времени. Особенно заметно это проявилось за несколько лет перед плинианским извержением в ходе активизации Квицапу 1926–1929 гг., описанной в работе [12].

Тем не менее, интервал времени между 1847 и 1932 гг. вероятно был недостаточен для сброса значительного количества “лишней” воды диффузионным путем. Поэтому в 1932 г. магма верхнего очага уже не могла в достаточной степени аккумулировать летучие, выделяющиеся из новой порции пересыщенной водой дацитовой магмы, и последнее извержение носило плинианский характер. Свидетельством того, что основные магмы в верхнем очаге в 1932 г. были более богаты растворенными летучими, чем в 1846 г., служат обильные шлаки основного состава, выброшенные в ходе плинианского извержения по сравнению с тонкопористыми мафическими включениями в лавах первого извержения. Причины, которые вызвали повторное движение дацитовой магмы из нижнего очага, не ясны, так же как не ясно, почему эта порция магмы не изверглась в ходе первого извержения. Несомненно, что новая порция поднималась с тех же глубин, как и предыдущая. Об этом свидетельствует как идентичность химизма и минералогии пород, так и прекрасная сохранность роговой обманки. Последнему обстоятельству способствовало и то, что скорость подъема дацитовой магмы в 1932 г., по-видимому, была даже выше, чем в 1846 г., т.к. она сохранила значительную долю газовой фазы, двигалась по уже существующему каналу и извергалась через ранее сформированный кратер, который был высокоактивен в предшествующие годы. Вулкан Сьерро-Ассуль, конус Квицапу, вулкан Дескабедзо-Гранде и новый кратер на его склоне расположены на одной прямой. Это указывает на то, что магматическая и вулканическая активность в 1932 г. здесь развивалась по разломной зоне, охватившей достаточно обширную область и повысившей магмопроницаемость фундамента.

ОБСУЖДЕНИЕ

Основным моментом предложенной схемы является предположение о существовании двух относительно независимо развивающихся магматических очагов, причем источник дацитовых магм должен располагаться на большей глубине, чем очаг более основных магм. По нашему мнению, более глубинное положение кислой магмы относительно основной при наличии двух пространственно разобщенных очагов вполне допустимо и не может рассматриваться как нечто неприемлемое. В случае вулканической активности Квицапу принятие такого строения питающей системы позволяет уложить

наблюдаемые факты в логичную схему. Сложное строение зоны питания Сьерро-Ассуль – Квицапу подтверждается полимодальным составом пород извержения 1932 г.

Ранее аналогичные выводы о строении питающих магматических систем получены в [9, 11]. В [9] проделан анализ комплекса петрологических и вулканологических данных для извержений конуса Штюбеля (центр современной активности вулкана Ксудач, Камчатка). Характерной чертой плинианского извержения вулкана Ксудач в 1907 г. была неоднородность состава его продуктов: в начале извержения были выброшены андезито-базальтовые – андезитовые шлаки, затем состав продуктов резко изменился, и стали поступать пемзы дацитового состава, причем достаточно характерны были полосчатые разности. Автор пришел к выводу, что питающая система Штюбеля состоит из двух магматических резервуаров: неглубокой камеры низкого давления, предположительно имеющей кровлю на глубине ~3 км, и более глубокой камеры высокого давления. Первая камера заполнена андезито-базальтовой магмой, а в более глубинном очаге происходит эволюция первичной высокоглиноземистой базальтовой магмы до дацитов. В процессе крупных эксплозивных извержений происходили инъекции дацитовой магмы из глубинного очага в андезито-базальтовую магму приповерхностной камеры. Предполагается, что именно декомпрессия сравнительно богатой водой и более холодной кислой магмы провоцировала сопряженное извержение двух контрастных по составу магм. Одновременное поступление дацитовой и андезито-базальтовой магм приводило к их механическому перемешиванию в вулканическом канале и образованию полосчатых лав, типичных для эксплозивных извержений конуса Штюбеля. В период покоя после крупных эксплозивных извержений за счет смешения двух магм, оставшихся в канале, происходило образование андезитов, которые обладают целым рядом характеристик, свидетельствующих об их гибридном происхождении. Здесь, как и в случае Квицапу, наблюдаемые факты объясняются взаимодействием магм двух разноглубинных очагов при более глубоком положении кислой магмы.

В [11] проанализированы характеристики извержения эруптивной пары Катмай–Новарупта в 1912 г., одного из крупнейших в XX столетии. Согласно представленной схеме, особенности извержения объясняются взаимодействием риолитовой и андезитовой магм, причем более кислая магма первоначально находилась на большей глубине. Риолитовая магма поднималась по дайке, которая частично вскрыла неглубокий очаг с андезитовой магмой. Вследствие этого произошел отток андезитовой магмы из очага в район нового эруптивного центра Новарупта и ее частичное смешение с риолитовой магмой с образованием дацитовой магмы. В результате, кроме преобладающих риолитов,

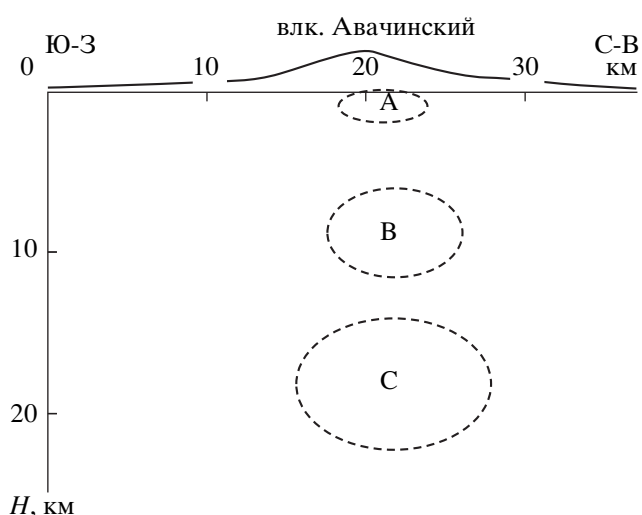


Рис. 2. Схематическое положение магматических очагов Авачинского вулкана по данным [5]: А – периферический магматический очаг, В – интрузивное тело, С – предполагаемый коровый магматический очаг.

был извергнут большой объем дацитов и подчиненные количества андезитов. Оба извержения пар Катмай–Новарупта (1912 г.) и Сьерро-Ассуль–Квицапу (1846–1847 гг.) явились крупнейшими по объему извергнутой магмы на своих материках и были первыми извержениями этих центров в историческое время. Примечательно, что преобладающие типы извергнутых пород ранее отсутствовали в данных регионах. Если в районе Катмая отсутствовали породы высокой кислотности (риолиты), то в районе Сьерро-Ассуль аналогичные по кислотности породы (кислые дациты) уже извергались, новым было появление в породах роговой обманки.

В [12] было отмечено также очень большое сходство между активностью вулканов Квицапу и Маунт Мазама (Каскадные горы), а также вулканизмом этих районов в целом. В частности, пароксизмальному плинианскому извержению вулкана Маунт Мазама предшествовали излияния больших объемов лавы роговообманковых риодацитов, содержащих многочисленные мафические включения, при идентичности составов магм эффузивного и плинианского извержений.

Реальность предлагаемой концепции косвенно подтверждается геофизическими данными о строении питающей системы Авачинского вулкана (рис. 2) [5]. Комплекс этих данных предполагает наличие на разных глубинах под вулканом двух магматических очагов. Кровля приповерхностного очага находится под конусом вулкана на глубинах 0–2 км, тогда как на уровнях средней–нижней коры (на глубинах порядка 15–25 км) располагается нижний очаг. Между этими очагами прослеживается интрузивное тело, что напоминает положение гранодиоритового массива в фундаменте вулкана Сьерро-Ас-

суль. Для начального этапа активности Молодого конуса Авачинского вулкана были характерны плиннианские извержения роговообманковых андезитов с последующим переходом к извержениям андезито-базальтовых составов [1]. В переходный период имели место извержения, продукты которых были представлены обоими этими составами, но с резким преобладанием сначала андезитов, а позже – андезито-базальтов. По-видимому, контрастный состав продуктов таких извержений также был следствием поступления вещества из разных очагов.

Взаимодействие магм, отличающихся по содержанию летучих, приводит к нарушению равновесного распределения летучих в очаге. Это может послужить причиной растянутой во времени дегазации и проявиться на поверхности в виде длительной фумарольной деятельности и слабой или умеренной эксплозивной активности. Последняя нередко интерпретируется как фреатическая, но, т.к. как она не вызвана взаимодействием магмы с водой вмещающих пород, по сути, является своеобразным проявлением магматической активности.

ВЫВОДЫ

Особенности распределения воды (и других летучих) в расплаве по вертикали приводят к тому, что магматический очаг может явиться ловушкой летучих, выделяющихся из поступающей в него порции глубинной магмы. Такая модель глубинной дегазации позволяет объяснить эффузивные излияния изначально богатых водой магм, в том числе кислых. Спустя десятилетия – сотни лет, вслед за эффузивным извержением (или этапом активности) может произойти крупное плиннианское извержение, которое будет обусловлено взаимодействием магм разноглубинных очагов, когда малоглубинный очаг уже не в состоянии аккумулировать значительную массу летучих из водонасыщенной глубинной магмы. Представляется, что это может являться одним из наиболее эффективных механизмов, вызывающих катастрофические извержения.

Появление нескольких контрастных составов в ходе одного извержения не обязательно является следствием зональности одной магматической камеры. Напротив, это может указывать на ярусность магматических очагов. Следует признать, что общепринятая точка зрения на менее глубинное положение очагов кислой магмы относительно положения магм основного состава не является универсальной. Вероятно, образование подобных магматических систем сложного строения могло иметь место в результате тектономагматической активизации после длительных периодов покоя, в течение которых в вулканических очагах происходила глубокая дифференциация магмы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 05-05-65300.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базанова Л.И., Брайцева О.А., Пузанков М.Ю., Сулержицкий Л.Д.* Катастрофические плиннианские извержения начальной фазы формирования молодого конуса вулкана Авачинский (Камчатка) // *Вулканонология и сейсмология*. 2003. № 5. С. 20–40.
2. *Кадик А.А., Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И.* Вода в магматических расплавах. М.: Наука, 1971. 267 с.
3. *Кадик А.А., Максимов А.П., Иванов Б.В.* Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов (на примере Ключевской группы вулканов). М.: Наука, 1986. 158 с.
4. *Кеннеди Дж.* О роли воды в магме // *Земная кора*. М.: ИЛ, 1957. С. 505–519.
5. *Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И.* Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // *Вулканонология и сейсмология*. 2003. № 4. С. 3–10.
6. *Пономарева В.В., Цюрупа А.А.* О протяженных потоках кислой жидкой лавы на вулкане Крашенинникова // *Вулканонология и сейсмология*. 1985. № 3. С. 85–92.
7. *Ярошевский А.А.* Физико-химические принципы поведения магматической системы расплав + газовая фаза в гравитационном поле // *Геохимия*. 2003. № 5. С. 561–569.
8. *Burnham C.W.* Development of the Burnham model for prediction of the H₂O solubility in magmas // *Reviews in Mineralogy*. 1994. V. 30. P. 123–129.
9. *Doubic Ph.* Study of the eruptive products from the three volcanoes in Kamchatka: insides into shallow magma evolution and dynamics // Ph. D. Thesis. SUNY at Buffalo. USA. 1997. 245 p.
10. *Eichelberger J.C., Carrigan C.R., Westrich H.R., Price R.H.* Non-explosive silicic volcanism // *Nature*. 1986. V. 323. P. 598–602.
11. *Eichelberger J.C., Izbekov P.E.* Eruption of andesite triggered by dike injection: contrasting cases at Karymsky volcano, Kamchatka and Mount Katmai, Alaska // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*. 2000. V. 358. P. 1465–1485.
12. *Hildreth W., Drake R.E.* Volcan Quizapu, Chilean Andes // *Bull. Volcanol.* 1992. V. 54. № 2. P. 93–125.
13. *Holloway J.R., Blank J.G.* Application of experimental results to C-O-H species in natural melts // *Reviews in Mineralogy*. 1994. V. 30. P. 187–230.
14. *Merzbacher C., Egger D.H.* A magmatic geohydrometer: application to Mount St. Helens and other dacitic magmas // *Geology*. 1984. V. 12. P. 587–590.
15. *Rutherford M.J., Devine J.D.* The May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens: 3. Stability and chemistry of amphibole in the magma chamber // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 949–959.
16. *Rutherford M.J., Hill P.M.* Magma ascent rates from amphibole breakdown: an experimental study applied to the 1980–1986 Mount St. Helens eruptions // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № B11. P. 19667–19685.
17. *Rutherford M.J., Sigurdsson H., Carey S., Davis A.* The May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens: I. Melt composition and experimental phase equilibria // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 2929–2947.

18. *Scaillet B., Evans B.W.* The 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo. I. Phase equilibria and pre-eruption P-

T-fO₂-fH₂O conditions of the dacite magma // *J. Petrology*. 1999. V. 40. № 3. P. 381–411.

A Physico-Chemical Model for Deep Degassing of water-Rich Magma

© 2008 г. **A.P. Maksimov**

Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

Two powerful eruptions of Quizapu Crater on Cerro Azul Volcano, Chile are used as examples to discuss the problem of effusive eruptions of magmas involving high preeruptive volatile concentrations. A physico-chemical mechanism is put forward for magma degassing, the volatiles being lost before coming to the surface. The model is based on the difference between the solubility of water in a melt and the water equilibrium concentration in a magma body having a considerable vertical extent. The shallower chamber can accumulate the volatiles released from the magma that is supplied from the deeper chamber. An explanation is provided of dramatic differences in the character of the 1846–1847 and 1932 eruptions, which have identical chemico-petrographic magma compositions.