

## РОЛЬ ВОДЫ В ВУЛКАНИЗМЕ

© 2019 г. Г. И. Арсанова

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006 Петропавловск Камчатский, бульвар Пийна, 9  
e-mail: agi888@list.ru*

Поступила в редакцию 21.09.2017 г.

Вода играет в вулканизме чрезвычайно важную роль: она действует как эвакуатор вязких расплавов разнообразными способами, что обеспечивается наличием соответствующих свойств у ее фазовых состояний, последовательно сменяющихся с падением параметров среды. В этом смысле особенно значимо сверхкритическое (флюидное) состояние воды. В работе дается сводка свойств флюидов, которые во многом уникальны. Свойства определяют взаимоотношения водного флюида и силикатного расплава, что в свою очередь, объясняет причину вулканических явлений и сам ход извержений: взрывы разной мощности, возникновение так называемой псевдооживленной массы, палящих туч, оползней и прорывов на склонах, образование игнимбритов, а также механизм переноса газов к подножью вулканов.

Как по роли, так и по количеству, вода — основное вулканическое вещество, которое вместе с силикатным расплавом составляет магму.

**Ключевые слова:** флюиды, свойства флюидов, вулканы, извержения, магма.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019469-80>

### ВВЕДЕНИЕ

Воду относят к так называемым летучим компонентам магмы, и она составляет их от двух третей до почти полностью. До десятой части от остальных летучих приходится на диоксид углерода. Прочие составляющие обнаружены в десятых и сотых долях от количества  $\text{CO}_2$  и представлены  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  (и другими углеводородами),  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ , а также благородными газами, серой и летучими соединениями некоторых металлов. Считается, что летучие находятся в магме в растворенном состоянии.

Оценка количества летучих по отношению к расплаву в извергаемом материале (базальты) была сделана на Северном прорыве Большого Трещинного Толбачинского извержения (БТТИ), и составила порядка 9% по массе, причем, по мнению ответственного редактора монографии С.А. Федотова [Большое ..., 1984], цифра представляется завышенной. На Южном прорыве БТТИ она дается как 4.5%.

Таким образом, главным извергаемым материалом в вулканологии считаются силикатные магмы. (Карбонатная магма известна на единственном вулкане в Танзании, и этот случай здесь не рассматривается). Летучие (то есть в основном — воду) относят к добавкам, причем есть мнение даже о коровой природе части извергаемой воды.

Так ли это? Насколько значима вода в вулканическом процессе, как она влияет на дина-

мику извержений и откуда поступает? В начале уясним, что известно о собственных свойствах воды при тех высоких параметрах, которые имеют место в вулканическом процессе.

Еще в 1822 г. экспериментально было установлено, что при определенных достаточно высоких давлениях (P) и температуре (T) газы перестают быть газами и превращаются в нечто похожее на жидкость, что потом стали называть флюидом. Однако изучить свойства флюидов из-за больших технических сложностей долго не удавалось. Положение изменилось в последние десятилетия, когда выяснился ряд уникальных свойств флюидов, из-за чего их начали использовать в промышленности. Тем не менее, общей работы по свойствам веществ во флюидном состоянии не создано; небогатая и обрывочная информация разбросана по разным источникам.

В геологии глубинное горячее водное вещество часто называют словом “флюид”, но представление о нем — весьма неопределенно. В нефтяной промышленности во флюидной фазе известны как сверхкритические растворители [Филенко и др., 2011]. В физике флюид понимается как фазовое сверхкритическое (СК) состояние вещества, которое часто называют “сверхкритикой”. В этом же значении оно используется и в настоящей работе.

Если водный флюид действительно участвует в извержениях — его свойства должны коррелировать с явлениями на извержениях, что будет

проанализировано ниже, как и участие в вулканическом процессе подземных вод и вод метеорного стока.

### О СВОЙСТВАХ ФЛЮИДОВ И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ЯВЛЕНИЯХ

Даже поверхностная оценка показывает, что временами выброс воды магмами настолько велик, что должна быть еще какая-то форма ее присутствия в канале, помимо растворенной. Совместимой с параметрами среды формой может быть водный флюид, но что известно о веществе во флюидном состоянии и его свойствах по данным физики?

Однозначное определение физического состояния среды, именуемой флюидом, в научной литературе не дано, но известно, что вещества во флюидной фазе имеют свойства и жидкости, и газа одновременно, не являясь при этом ни тем, ни другим. Ныне принимается, что флюиды представляют собой гомогенные вещества, существующие только при высоких  $P$  и  $T$ , а их флюидное состояние наступает с переходом критических, своих для каждого вещества, значений этих параметров (таблица). Вещества в СК-состоянии обозначают как СКФ (сверхкритический флюид), или с указанием формулы: например, СК<sub>n</sub>o – сверхкритический водный флюид.

Разные по составу СКФ активно смешиваются между собой, а критические параметры смеси рассчитывают как их среднее арифметическое. Значит, критические параметры воды с добавкой диоксида углерода или других газов будут ниже, чем просто у воды.

Согласно исследованиям структуры СКФ Ю.Е. Горбатым и Г.В. Бондаренко [2007], их нельзя считать и вполне гомогенными: “В физическом смысле это, скорее, микрогетерогенная смесь газоподобных и жидкоподобных конфигу-

раций молекул, быстро сменяющих друг друга”. Но А.В. Кочетков и П.В. Федотов [2016] объясняют флюидное состояние существованием окружающей молекулы межмолекулярной среды высокоэнергичных тепловых фотонов, электромагнитное поле которых подавляет межмолекулярные связи.

В связи со сложностью работ с СКФ из-за высоких параметров их существования (особенно с водным), не все их характеристики и свойства известны, но уверенно можно обозначить:

- крайне низкую вязкость, дающую очень высокую подвижность и химическую активность;
- непрерывно меняющееся движение молекул, что обеспечивает смешивание СКФ друг с другом и с различными жидкостями, в том числе с расплавом;
- высокий коэффициент диффузии;
- быстрый массоперенос смесей с СКФ, осуществляемый благодаря наличию вышеперечисленных свойств;
- способность сжиматься, свойственную газам, но не свойственную жидкостям;
- эффективную растворяющую способность, которая контролируется давлением, и свойственна жидкостям, но не свойственна газам: СК<sub>n</sub>o принимает в себя и переносит вещества, практически нерастворимые в обычных условиях (силикаты, оксиды, сульфиды и другие), а в смеси с расплавом силикатов между ними возможен обмен компонентами;
- быстрое отделение веществ, смешанных с СКФ, со сбросом давления. Например, кофейные зерна обрабатывают СК<sub>co</sub>, затем отделяют его и испаряют. Остается чистый кофеин. Возможно, сходным способом образуются некоторые вулканические взгоны;
- проникновение в пористые среды, значительно более легкое, чем у жидкой воды;
- высочайшую способность растворять в себе газы и транспортировать их компактным способом в отличие от горячей воды, где газы не растворяются;
- способность неограниченно смешивается с кислородом, водородом и углеводородами, облегчая их взаимодействие между собой, что ведет к очень быстрому протеканию реакций окисления [Жузе, 1981; Леменовский, Баграташвили, 1999; Галкин, Луин, 2005; Залепугин и др., 2006; Горбатый, Бондаренко, 2007; Соболева, 2013 и др. работы].

Состояние (и, стало быть, свойства) воды в условиях выше критических параметров не только значительно отличаются от ее состояния (и, следовательно, — поведения) до них, но еще и в большей мере, чем для других веществ. Если при нормальных  $P$  и  $T$  вода является полярным растворителем, то в СК-состоянии она

**Таблица.** Значения критических давлений и температур некоторых вулканических газов [Реальная физика. <http://bourabai.kz/physics/1849.html>]

|                                  | $T_c$ , К | $P_c$ , МПа |
|----------------------------------|-----------|-------------|
| Водород H <sub>2</sub>           | 33.24     | 1.30        |
| Азот N <sub>2</sub>              | 126.25    | 3.400       |
| Оксид углерода CO                | 132.93    | 3.499       |
| Кислород O <sub>2</sub>          | 154.58    | 5.043       |
| Метан CH <sub>4</sub>            | 190.66    | 4.626       |
| Диоксид углерода CO <sub>2</sub> | 304.13    | 7.375       |
| Сероводород H <sub>2</sub> S     | 373.6     | 9.007       |
| Диоксид серы SO <sub>2</sub>     | 430.7     | 7.88        |
| Вода H <sub>2</sub> O            | 647.30    | 22.12       |

превращается в практически неполярную среду и становится сильнейшим окислителем. СК-параметры меняют структуру водородных связей, отчего растет (в сравнении с жидкой водой) диэлектрическая проницаемость, электропроводность и ионное произведение  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$ , что определяет электрические, магнитные и другие свойства среды с ним. Не случайно извержения сопровождаются множеством молний.

Зная свойства СКФ, можно предвидеть, каким образом  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$  будет взаимодействовать с расплавом силикатов в вулканическом канале.

Известно, что растворимость воды в силикатах — ограничена, но  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$  может смешиваться с расплавом в любых количествах: таково его свойство. При этом сам  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$  будет иметь какое-то количество силикатов растворенными. Следовательно, существование в вулканическом канале при высоких параметрах расплава силикатов с растворенной водой и  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$  с растворенными силикатами отвечает свойствам обоих, а отношение  $\text{H}_2\text{O}$ /силикаты в канале, возможно, самое различное. Вода при этом будет присутствовать в двух формах, имеющих разные свойства, и потому — разное поведение, но обе эти формы, хотя и в разной степени, увеличивают подвижность магм.

Теоретическое обоснование возможности любого соотношения  $\text{H}_2\text{O}$ /силикаты в вулканическом канале является очень важным геологическим выводом, так как снимает ограничение количества воды в связи с магмами.

Само понятие магма необходимо расширить, принимая его не только как силикатный расплав с растворенной водой, но еще и как “смесь” (условно) этого расплава с  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$  (водным флюидом). Структура такой магмы — не вполне ясна (как и вообще веществ в условиях СК). Повидимому, силикатный расплав и  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$  сосуществуют в виде протяженных молекулярных кластеров, причем их соотношение может меняться при движении по каналу. Иными словами:  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$  и расплав могут двигаться относительно друг друга.

Современные математические модели мощных вулканических взрывов объясняют их причины накоплением в апикальной части канала диффундирующих через расплав бывших растворенных газов. Существование флюидной фазы и ее влияние на поведение вулканического материала в канале этими работами не анализируется. Например, по Ю.Б. Слезину [1998] задача описания процесса извержения сводится “к описанию потока дегазирующейся магмы в канале вулкана под действием перепада давлений”.

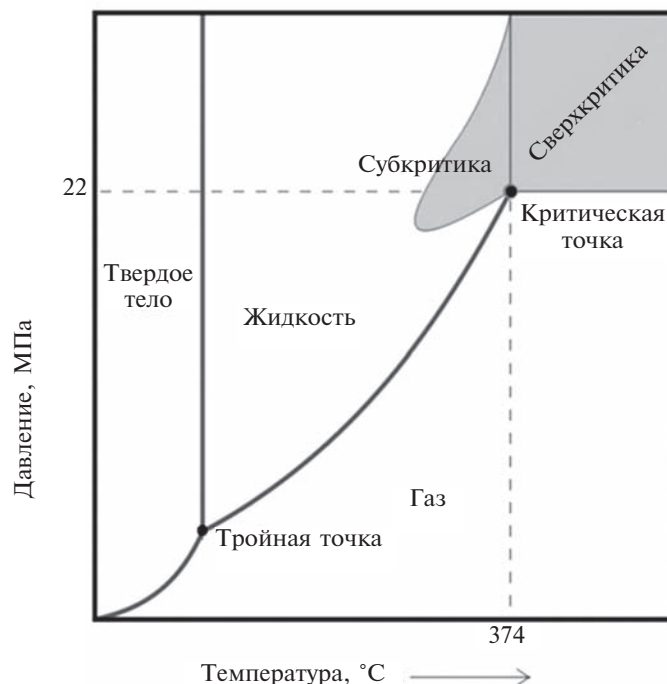
Однако механизм, связанный с фазовым переходом  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}} \rightarrow$  газ, представляется более вероятной причиной взрывов. Спусковым механизмом

здесь служит падение параметров в канале ниже критических для существования  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$ . Внешне процесс превращения  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$ , пребывающего в смеси с расплавом, в газ подобен кипению расплава. Увеличение объема идет одновременно во множестве точек. Магма дробится возникающими в ней повсеместно газами в пену, рвется в пудру, превращается в пористые бомбы и потоки газонасыщенных лав. Такой механизм не требует предварительного перехода газов из растворенного состояния в свободное, их движения сквозь расплав и накопления, а также и очагов как места их аккумуляции, наличие которых предполагается лишь по геофизическим аномалиям.

Таким образом, механизм возникновения газов одновременно во множестве точек магмы при фазовом переходе СКФ  $\rightarrow$  газ отличается от ранее предлагаемого механизма накопления газов в апикальной части при подъеме сквозь вязкую магму газовых пузырьков (1) скоростью нарастания давления и (2) объемом задействованного материала, что делает его более вероятным в выборе причин взрывов.

Критическая температура существования водного флюида (+ 374°C) не столь велика, а добавка  $\text{CO}_2$  как и других газов, ее только снизит. Вулканические продукты, даже на поверхности, имеют значительно более высокие температуры, поэтому управляющим параметром фазового состояния  $\text{H}_2\text{O}$  в канале скорее будет давление, с падением которого все СКФ превратятся в газы. На диаграмме рисунка фигуративная точка из области “сверхкритики” переместится вниз.

Но в природе так происходит не всегда. Критическое давление воды в 22 МПа (218 бар) соответствует литостатическому на глубине порядка 7–8 км. Если бы состояние вещества мгновенно реагировало на параметры среды, то СКФ не могли бы дойти до поверхности, а доходил бы только газ. Но (1) литостатическое давление не определяет давление в вулканическом канале (хотя как-то с ним связано), (2) скорость подъема может опережать скорость фазового перехода, (3) первые порции вулканического материала идут по еще непрогретому каналу и, встречаясь с холодной пробкой, успевают несколько остыть. Поэтому фазовый переход  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$  может случиться и на фоне снижающейся  $T$ . Тогда  $\text{СК}_{\text{H}_2\text{O}}$  превратится в “перегретую” воду. Фигуративная точка из области “сверхкритики” (см. рисунок) пойдет влево. В этой части диаграммы она может попасть в область “субкритики” (sub — ниже, около) что означает сохранение флюидного состояния. Границы “сверхкритики” размыты, что отражает особенность состояния вещества в этой области. В природе такой фазовый переход, судя по всему, случился при извержении вулкана Мон-Пеле.



**Рис.** Фазовая диаграмма воды (с упрощениями).  
Плотность ( $\rho$ ) воды в критической точке  $322 \text{ кг/м}^3$ .

Из рассуждений следует, что вода вблизи кратера — под ним или сразу после — может быть в трех фазовых состояниях (помимо растворенной в магме): СКФ, газ и жидкость. Много ниже кратера (при давлении выше 22 МПа) вода может быть как растворенной, так и как СК<sub>н</sub>О, но свободных газов здесь быть не может: либо они будут флюидами, либо частично растворятся в расплаве, либо — без ограничений в любых СКФ.

#### О СОСТОЯНИИ ВОДЫ В ГЛУБИННЫХ ЧАСТЯХ ВУЛКАНИЧЕСКОГО КАНАЛА

А каково может быть состояние воды в канале еще глубже? Данных об этом очень мало, и высказать можно только предположения и запреты, но и они не будут лишними.

Ныне принято считать, что до самых “корней” вулканической структуры вещество канала представлено все той же магмой, под которой понимается силикатный расплав с растворенными летучими (то есть в основном — с водой). С подъемом магма дифференцируется и смешивается в различных отношениях с другими расплавами в гипотетических очагах; образуются системы таких взаимосвязанных очагов. См., например, работу по Ключевской группе вулканов, где выводы сделаны “на основании методов вулканологии, сейсмологии, геодезии и матема-

тического моделирования” [Федотов и др., 2009].

Вместе с тем если принять современные представления физиков о состоянии вещества в условиях высокой плотности энергий, оцененные В.Е. Фортовым как надежные [Киржниц, 1971; Фортов, 2009], то следует допустить хотя бы частично атомарное состояние вещества уже на уровне “корней” вулканов. В предположении много неопределенностей. С одной стороны — перестройка материи на микроуровне начинается при давлении выше 0.5 Мбар [Фортов, 2009], что соответствует глубине порядка тысячи км. С другой — время экспозиции используемого физиками метода алмазной наковальни слишком коротко —  $10^{-6}$ – $10^{-9}$  сек [Фортов, 2007], а это позволяет допустить, что длительное воздействие сможет “сломать” молекулы и при более низком давлении. Уже свойства астеносферы, куда, как предполагают, “уходят корни” вулканов, говорят об ионизированном состоянии вещества там. Поэтому нет уверенности даже в самом существовании молекулы воды на уровне “корней” вулканов.

Однако, хотя состояние материи на таких глубинах — неясно, однозначно то, что это — не молекулярный силикатный расплав с растворенными летучими, то есть — не магма. Тогда между этой “не магмой” и магмой у поверхности лежит путь глубокой трансформации: последовательно исчезают атомарные формы, появляются и по-

этапно усложняются молекулярные, новые молекулы через серию промежуточных форм превращаться в новейшие ... и так до поверхности.

Согласно данным А.Ю. Озерова [2016] в случае Ключевского вулкана по геологическим и геофизическим данным разнообразие расплавов предположительно возникает в 35-километровом генеральном канале вулкана, но выводы получены на основании образцов пород с поверхности, как доступных.

Между тем реакции, идущие в области сверхкритических параметров, и их продукты не просто сложны – они принципиально иные, не похожие на все известные. По мнению специалистов, работающих с веществом в СК-состоянии, их невозможно предсказать – настолько они необычны [Леменовский и др., 2006]. О ненадежности экстраполяций в область высоких давлений предостерегал и В.Е. Фортов [Фортов, 2007, с. 357].

Можно попытаться подойти к проблеме с другой стороны: посмотреть на вулкан в свете современных синергетических концепций [Степин, 2009], как это предлагают ведущие специалисты в этой области, например Е.Н. Князева и С.П. Курдюмов [1994]. С этих позиций геологическое образование вулкана предстает как самоорганизующаяся природная динамичная диссипативная структура, которая, как таковая, должна обладать общими свойствами таких структур. Одним из этих общих свойств является перманентная перестройка с подъемом вещества на микроуровне за счет собственной внутренней энергии [Пригожин, Стенгерс, 1986]. Так как перемещение вещества идет из области высокой плотности энергий в область меньшей плотности, реакции пойдут с выделением тепла (положительная обратная связь) и увеличением объема. Переходные молекулярные формы промежуточного состава будут более разуплотненными и более сложными по структуре и составу, причем изменения могут отставать от снижающихся параметров среды. Поэтому то, что только что покинуло вулканический канал, будет неравновесным со средой продуктом, и его внутренние реакции будут продолжаться, и возможен его разогрев и образование новых минеральных и газовых форм, а так же сохранение реликтов глубинных форм, что, по-видимому, и происходит.

Можно экспериментально до какого-то уровня “прокрутить” трансформацию вулканического вещества в обратном порядке (от низких параметров к высоким), но такой процесс и его продукты не адекватны превращениям в канале из-за необратимости природных явлений. Необратимость как свойство, играющее в природе фундаментальную роль, является

одним из основных понятий всех наук о природе [Пригожин, Стенгерс, 1986; Эбелинг, 1979; Чернавский, 2001; Николис, Пригожин, 2014 и др.]. Обратимость свойство замкнутых систем; природные системы открыты.

Повторить трансформацию поднимающегося вещества пока невозможно по причине неясностей его начального состояния и сложности экспериментальных работ в области столь сверхвысоких параметров.

Объяснения перестройки по аналогии с реакциями в обычных условиях – некорректны априори. Их ход и результат не аппроксимируются этими реакциями.

Осознавая вышеизложенное, не приходится обольщаться геологическими гипотезами: однозначно только понимание чрезвычайной сложности трансформаций структуры и состава поднимающейся магмы. Расплав, вода и газы на поверхности и магма, дающая им начало в глубинах Земли, даже являясь одним и тем же по набору элементов, похожи друг на друга не более, чем гусеница на бабочку. “Реальный мир нам виден через окошко конечной ширины” [Николис, Пригожин, 2014, с. 237] и оно не слишком велико. В этом сложность создания и причина отсутствия удовлетворительной понятийной модели вулканического процесса, а без нее математические модели не более, чем упражнения в счете, а прогнозы не состоятельны.

Достоверным источником информации можно считать непосредственные наблюдения извержений и их продуктов в самые первые мгновения появления их на дневной поверхности: их характеристики отражают состояние веществ в канале, хотя бы в его верхней части, но подлинны. В извергнутом материале возможны реликтовые следы глубинных форм. В этом особая ценность наблюдений и геологических находок на Большом Трещинном Толбачинском извержении [Большое ..., 1984], как и на других вулканах.

## ВОДА КАК ЧАСТЬ МАГМЫ

*(по наблюдению явлений  
на извержениях вулканов)*

Наблюдая различные явления на извержениях, можно судить о том, участию какого вещества оно обязано, если, конечно, заранее известны их свойства.

Проанализируем, как свойства разных форм воды проявляются в особенностях вулканических явлений на различных ранее описанных извержениях.

Рождение вулканов (наблюдалось только базальтовых) начинается с предварающих зем-

летрясений, иногда сопровождаемых гулом. Участок воздымается, и возникает трещина, из которой первыми являются белые пары; затем темные выбросы пепла, наращивающие конус или конусы. Лава, как правило, изливается несколько позже, что само по себе показательно.

Видимые пары не могут быть нагретыми местными вадозными водами (если только лава не излилась в водоем!). Выпирающее глубинное вещество меняет наклон пород во все стороны от рождающегося вулкана: если холодные воды и были во вмещающих породах, то они будут отеснены на периферию. Если соприкосновение холодной воды с горячей магмой состоится, то магма мгновенно превратит воду в пар, давление в точке соприкосновения резко увеличивается и подступающие порции воды будут отброшены. Пространство вокруг растущей постройки становится областью просушки.

Отсюда вывод: пары, видимые при рождении вулкана, это в основном – вода, поступающая по вулканическому каналу вместе с магмами.

И растворенная вода, и смешанный с расплавом водный флюид снижают вязкость магм своим присутствием, делая ее более мобильной, но флюид способен еще и быстро диспергировать расплав с превращением его в подвижную псевдооживленную массу. Наблюдать эту массу можно только в ходе извержений: с остыванием она превращается в пепел и пемзу, и вернуть ей прежнюю подвижность уже невозможно.

Явление есть следствие свойств воды и пеплов. Как СКФ, вода с расплавом смешивается; став газом, она его рвет (диспергирует). Не весь флюид разом меняет фазу. Часть его выступает в роли очень скользкой смазки для силикатных частиц. Силикаты в форме пеплов обладают множеством внутренних полостей, трещинок и капилляров, что увеличивает глубину диффузии в них  $СК_{H_2O}$ , а у последнего очень низкая когезия (межмолекулярное притяжение). Именно поэтому пепел, в смеси с  $СК_{H_2O}$ , превращается в массу, более мобильную, чем расплав, который, остывая, становится все более вязким. И, похоже, в этом и есть причина отставания в начале извержений расплава от пеплов.

Такая же псевдооживленная масса слагает “новорожденные” конусы. Свойства СКФ хорошо объясняют динамику их форм: горизонтальные перемещения вплоть до отторжения отдельных частей (т.н. отторженцы) и проседания отдельных их участков при остывании. Явления наблюдались при БТТИ [Большое ..., 1984].

Превращение  $СК_{H_2O}$  в жидкую воду (в более вязкое вещество с высоким поверхностным натяжением) сопровождается ее стягиванием, стремлением собраться в объем с минимальной поверхностью. Частицы пепла прижимаются

друг к другу, и ранее столь мобильный материал становится плотным мокрым неподвижным пластом, похожим на песок.

Диспергирование расплавов флюидами, по-видимому, вообще универсальный способ ликвидации различных непроходимостей канала в вулканическом процессе и можно предположить, что диспергация идет не только у поверхности, но и до каких-то глубин. Возможно, ее следствием был таинственный белый пепел на Толбачинском извержении.

Участие  $СК_{H_2O}$  в эвакуации на поверхность расплава иногда можно наблюдать по влажности пеплов. Очевидцы показывают, что вблизи извергающихся вулканов пеплы падают мокрыми, теплыми и даже горячими, и идут теплые дожди. По свидетельству женщины, бывшей на судне в бухте, во время взрыва Мон-Пеле 08.05.1902 “на нас повалил горячий влажный пепел” (из газет).

Водой на пеплах не может быть атмосферная влага, так как пепел теплее ее. Принимая во внимание, что теплоемкость воды в несколько раз (~ 4) выше теплоемкости силикатов, температура пепла в атмосфере снизится раньше, чем температура извергнутой одновременно с ним  $H_2O$ , поэтому последняя будет конденсироваться на пепловых частичках и от нее они станут мокрыми. Люди, попавшие под извержение вулкана Тааль 30.01.1911, вспоминают: “Полминуты шел легкий теплый дождь”. Кратковременные теплые дожди знакомы вулканологам, работающим на извержениях.

В кислом вулканизме наряду с извержением пеплов, случаются и предварающие основной взрыв огромные выбросы кипящей (“перегретой”) воды. Известно, что за 2 недели до катастрофического взрыва 08.05.1902, на вершине вулкана Мон-Пеле “возникли струи пара”, а еще через два дня кратер, шириной до 200 м, стал кипящим озером, рядом с которым заработал десятиметровый фонтан кипящей же воды.

Мон-Пеле – это пример извержения, когда после долгого молчания (охлаждения канала) на фронте поднимающегося вулканического вещества двигался преимущественно  $СК_{H_2O}$  (расплава было мало). Охладившись, но находясь еще под достаточным давлением, первые порции  $СК_{H_2O}$  стали жидкой кипящей водой (см. рисунок – фигуративная точка уходит влево), которая какое-то время удерживалась на кратере. Пару недель спустя, по прогретому каналу поднялась основная масса  $СК_{H_2O}$  с относительно небольшим количеством диспергированного расплава (небольшие извержения пеплов были). Высокое содержание  $СК_{H_2O}$  при относительно низком содержании расплава обеспечило очень низкую вязкость вулканического материала, стремительность подъема и мощность взрыва. Нижние порции

$\text{СКн}_2\text{о}$  не успевали превратиться в газ, оставаясь во флюидной фазе. Будучи легкими ( $\rho$  – в критической точке  $322 \text{ кг/м}^3$ ) и очень “скользкими”, они стремительно покатались к подножью, образовав смертоносную палящую тучу.

В 1962 г. Г.С. Горшков, работая на вулкане Катмай в Долине Десяти Тысяч Дымов вместе с Г.О. Тазиевым, задался вопросом о разнице извержений похожих вулканов: камчатского Безымянный и аляскинского Катмай. Отложения Безымянного представлены конгломератом из кусков породы разных размеров, а на Катмай – спекшимися игнимбритами. По мнению Г.О. Тазиева [1980], возникшие после взрыва вулкана Катмай “дымы” Долины, представляли собой нагретые воды местной речной сети. Изобилие поверхностных вод есть и на Аляске и на Камчатке, но такой Долины, как на Аляске, рядом с камчатским вулканом не образовалось. Следует упомянуть рождение слабого подобия Долины над руслами “сухих” речек после мощного извержения Безымянного в ночь с 30.06. на 01.07.1985 г. [Мальшев, 2000, с. 84, рис. 32]. Здесь в руслах даже летом лежит много снега, который прогрелся накрывшим его пирокластическим потоком. Началось множественное точечное парение разной интенсивности, вплоть до фреатических взрывов. Но внешне похожее явление затихло всего через пару дней.

Сравнение свойств  $\text{СКн}_2\text{о}$ , пара, извергнутого материала и последующих “дымов” помогает понять генетическую разницу: аляскинскую Долину создал и поддерживал несколько лет, извергающийся прямо из склонов глубинный  $\text{СКн}_2\text{о}$ . Разница извержений – в количестве и длительности извергаемого  $\text{СКн}_2\text{о}$ . На Безымянном его было значительно меньше, и создать камчатскую Долину было не из чего. Речная сеть может создать слабое подобие Долины, но всего на день–два, в то время как аляскинская Долина существовала годы.

Когда в составе магмы очень высоко отношение флюида к расплаву, то меняется сам характер извержения. Низкое поверхностное натяжение и высокая диффузия позволяют “юркому” флюиду внедряться в стенки канала и далее – в насыпные породы вулканического конуса, что ослабляет трение, которым удерживается рыхлый материал. Начинаются оползни, обвалы, и даже разрывы на склонах с образованием кратеров и извержений флюида прямо из них.

Оползни и обвалы наблюдались на вулканах Безымянный и Шивелуч [Мальшев, 2000; Белоусов, 2006], на вулкане Ламингтон (Новая Гвинея) перед извержением 21.01.1951 г., при БТТИ и во многих других случаях. Попытки объяснения их действием скопившихся метеорных вод [Белоусов, 2006] – не корректны: на

конусе нет мест, где бы метеорные воды могли задержаться, так как он представлен насыпным рыхлым материалом (без глин) с наклоном от центра к подножью. Оползни не коррелируют с сильными дождями; они возникают за минуты перед извержениями. Трение между блоками насыпного материала снижается диффундирующим  $\text{СКн}_2\text{о}$ , так как он (в отличие от жидкой воды!), обладает низкой когезией при высокой адгезии.

Направленные взрывы на склонах помимо вулкана Катмай наблюдались на вулкане Тааль (Филиппины) во время сильнейшего извержения 30.01.1911 г. Вулкан “выбрасывал из кратеров на склонах горы не лаву, а массы белого раскаленного пепла и перегретого пара”. Косая направленность взрывов здесь определяется не наклоном подводящего канала, как часто полагают, а проникающими способностями  $\text{СКн}_2\text{о}$  в сочетании с механической слабостью отдельных участков склонов.

Фазовые переходы и метастабильность воды есть причина отравления людей газами на склонах много ниже кратера в случае извержения палящих туч. Если бы вулкан на уровне кратера извергал отравляющие вещества в газовой фазе, то будучи горячими, они сразу же уходили бы вверх. Но вода, находящаяся в составе палящей тучи, присутствует в ней в фазе флюида, который удерживает газы растворенными. Только скатившись к подножью, флюид меняет фазу. Газы освобождаются и действуют как отравляющие.

Оставшиеся в живых после извержения вулканов Мон-Пеле и Ламингтона люди описывали следующую последовательность симптомов отравления газами: боль во рту, горле и глазах, жжение в груди, животе и, наконец, стремительное удушье. Тела погибших затвердевают из-за свертывания белков в мускульных тканях, что может быть следствием  $\text{СО}$ , а также и других, не выявленных газов.

Свежие пеплы считаются в быту плодородными. Это можно объяснить наличием на их поверхности солей улетучившегося  $\text{СКн}_2\text{о}$ . Образец свежего пепла со склона конуса Южного прорыва БТТИ 1976 г. [Титаева и др., 1978] показал присутствие цезия в ураганных количествах: 0.031% на породу. Оно на два с лишним порядка превышает содержание элемента в лавах. Принимая во внимание особенности геохимии цезия (элемент слабо переходит в природные растворы и быстро их покидает [Арсанова, 2013]), такое содержание элемента однозначно говорит о  $\text{СКн}_2\text{о}$  как его источнике, и, следовательно, указывает на участие  $\text{СКн}_2\text{о}$  в пеплообразовании.

Очень высокие содержания цезия (до 82.6 мг/л) были определены в конденсатах

паров над магматическим расплавом Южного прорыва БТТИ [Большое ..., 1984, с. 300] и там же — ультравысокие содержания платины (до 39.7 мг/л). Интересен весь комплекс элементов паров над расплавом, но даже в связи с этими двумя в качестве генетических индикаторов можно утверждать, что расплав их источником не является. Их источник — сам  $\text{СКн}_2\text{О}$ , причем не просто как водная среда, выщелачивающая элементы из пород. Скорее всего, все макро- и микрокомпоненты  $\text{СКн}_2\text{О}$  возникли вместе и одновременно с молекулой  $\text{Н}_2\text{О}$  и в этом смысле его можно назвать (условно) своеобразным “флюидным минералом”, имеющим собственную элементную специализацию и геохимическую историю.

Можно предположить, что в корнях вулканической структуры, то, что потом станет силикатным расплавом и водой, возникает одновременно как первые молекулярные формы магмы. С подъемом идет их трансформация и перераспределение элементов между этими основными молекулярными кластерами сообразно их свойствам и параметрам среды. Химические равновесия не устанавливаются из-за быстро меняющихся параметров, поэтому на лавовых потоках ожидаемы реликтовые формы. По-видимому, к таким формам можно отнести находки углерода в виде графита и алмаза, а также находки самородных металлов — Fe, Al, Cu, Zn, Sb, Au [Карпов и др., 2014; Гордеев и др., 2014].

И еще один вулканический продукт образуется при активном участии  $\text{СКн}_2\text{О}$ , что видно по высокому содержанию в нем цезия, — это вулканические стекла [Григорьев, 2008].

Известно, что особенностью вулканического материала является его долгое остывание, и даже разогрев. В. Ламингтон: “В местах, где пепел оказался защищенным от проникновения грунтовых вод и выпадения дождей, поднимавшиеся от него струйки пара достигали температуры 90 °С даже два года спустя” (из газет). Вторичный разогрев был подмечен на БТТИ, а еще ранее — Б. И. Пийпом и другими исследователями. Разогрев — явление известное; его причины — экзотермические реакции, но участвует ли в них воздушные газы или только извергаемый материал?

Ныне воздушные газы принято считать участником целого ряда химических реакций на извержениях. Но для этого у холодных атмосферных газов должно быть свойство проникать в раскаленный пирокластический материал. Чтобы понять возможность такого механизма, обратимся к основам теплофизики, например, к учебнику по теплопереносу [Суслов, 2008]. Теплофизика определяет теплоперенос как явление векторное. Направление опре-

деляется градиентом поля температур, причем всегда в сторону меньших температур каким бы ни был вид теплообмена: кондуктивным или конвективным. Вулкан создает на границе двух сред — воздушной и твердой — тепловую аномалию, подпитываемую из центра. Вектор температур направлен от центра этой аномалии и, следовательно, двигаться во все стороны от вулкана будет горячее вещество. Холодному воздуху “против правил” внедряться в горячую постройку и участвовать в газовых реакциях.

Теоретическим положением не противоречат и натурные наблюдения. Так киносъемка океанских курильщиков журналом National Geographic показала, что извергнутый материал сначала столбом “протыкает” океанскую толщу на несколько сот метров вверх, а затем закручивается в плоский диск. Диск “отрывается” и немалое время путешествует в толще океанской воды, не смешиваясь. Контрастность с атмосферой вертикальных выбросов наземных вулканов, тоже демонстрирует их несмещение с газами внешней среды, хотя бы в районе самой вулканической постройки.

Горячие вулканические газы могут “языками” внедряться в атмосферу и затекать по поверхности в удаленные места (известны случаи отравления скота), но холодный воздух, согласно правил теплофизики, не может “подтечь” к горячей вулканической постройке или “пронизать” ее. Поэтому такие явления, как взрывы газов над конусом, газовые реакции над потоками лавы в горнитосах, а так же вторичный разогрев, скорее всего, представляют собой экзотермические реакции самого вулканического материала и прежде всего фазовые переходы воды. Прижерловые явления похожи на заключительные аккорды трансформации магмы, понять которые в деталях еще только предстоит.

Те же теплофизические законы говорят, что некорректно вычитать (как это сейчас принято) воздушные газы из составов газов, отобранных на действующих вулканах, считая их подмешавшимися атмосферными. Здесь требуются серьезные обоснования и доказательства, так как вопрос напрямую связан с происхождением Земной атмосферы.

В заключение этого раздела, сопоставляя характер вулканических явлений на извержениях со свойствами воды в разных формах (растворенная, свободная) и фазах (флюид, газ, жидкость), необходимо отметить следующее.

1. Соотношение  $\text{Н}_2\text{О}$ /расплав магм возможно самое разное; оно указывает на потенциальную силу вулканических взрывов конкретного вулкана;

2. Множество вулканических явлений объясняется участием в них воды. Вода чрезвычайно



“изобретательна” в качестве эвакуатора силикатного материала, но и не только:

- она снижает вязкость магм своим присутствием, умеренно растворяясь в расплаве, и неограниченно смешиваясь с ним как  $СКН_2О$  (водный флюид);

- она диспергирует расплав (находясь с ним в смеси) в пепел, и на “остатках”  $СКН_2О$  создает из этого пепла мобильную псевдооживленную массу;

- смена фаз  $СКН_2О \rightarrow$  газ предвещает взрывы всех мощностей;

- как  $СКН_2О$  она обеспечивает перенос со скольжением различной пирокластики по поверхности в форме стремительной палящей тучи;

- как  $СКН_2О$  она проникает сквозь стенку вулканического канала и материал насыпного конуса, создавая оползни, обвалы, и даже истечения через прорывы склонов с образованием кратеров;

- как  $СКН_2О$ , длительно изливаясь на пирокластику, она спекает ее в игнимбриты;

- как  $СКН_2О$  она участвует в образовании вулканических стекол, что видно по высокому содержанию в них цезия;

- как  $СКН_2О$  она выносит газы связанными в составе палящей тучи, а со сменой фазы освобождает их, делая отравляющими, но уже у подножья вулкана.

При таких многообразных функциях относить воду, участвующую в вулканическом процессе, к добавкам было бы не вполне корректно. Как по роли, так и по количеству — вода также есть основное вулканическое вещество. Вместе с расплавом они составляют магму, которая наблюдается на поверхности при извержениях и которая существует такой предположительно до глубин порядка 5–10 км.

Состояние магмы глубже, ее свойства и поведение там иные, но эти особенности еще далеко не ясны.

#### ОБ УЧАСТИИ В ИЗВЕРЖЕНИЯХ ВАДОЗНЫХ ВОД

О воде, как основном взрывчатом веществе в вулканизме по аналогии с паровым котлом, исследователи догадывались еще со времен взрыва в. Кракатау в 1883 г., а возможно и раньше. Но тогда считалось, что за взрывы ответственна нагретая подземная или поверхностная вода. Положение о нагреве холодных вод не аргументировалось; оно представлялось очевидным [Тазиев, 1979]. Такие взрывы стали называть взрывами бандайсанского типа, или фреатическими.

Однако проникновение холодных вод в вулканический канал, как и их нагрев до состояния

флюида, в условиях верхней части коры практически не возможны. С расплавом смешивается  $СКН_2О$  (это его свойство), но не жидкая вода или пар. Для превращения во флюид вода должна нагреться выше  $374^\circ\text{C}$ , находясь при давлении не менее 22 МПа, что невозможно без замкнутого пространства. Но чтобы поверхностная или подземная вода пришла в соприкосновения с горячей магмой (источник нагрева) пространство для ее движения должно быть открытым. Поток поступающей холодной и отток уже нагретой воды должны быть организованы как в теплообменнике, “сооружение” которого, да еще всякий раз к случаю, вообще не приходится требовать от природы. Если холодная вода “залилась” через открытый кратер в канал, как в стакан, то она останется “лежать” на поверхности кратера, так как канал относительно закупорен, а давление в нем выше, чем снаружи. Наблюдения показывают: “проснувшись”, вулкан просто “выплюнет” эту воду, как мелочь, и начнет “работать по своим правилам”. Так вулкан Келуд (о. Ява), взорвавшись 19.05.1919 г., разом выбросил всю воду кратерного озера. Вода взметнулось и обрушилось на склоны вулкана, погубив (потопив), порядка 6 тыс. жителей равнин у подножия горы мощным лахаром. Но, не сжигая их и не травя газами, как было бы в случае палящей тучи, где главным действующим агентом выступает глубинная вода в СК-состоянии.

Так как по правилам теплофизики движение и тепла и вещества идет по температурному градиенту, холодная вода “не пытается” приблизиться к горячему вулканическому каналу, но и канал хорошо герметизирован. Наблюдения показывают, что вулканические склоны часто полностью заснежены, и даже в кратерах лед соседствует с высокотемпературными (до  $800\text{--}900^\circ\text{C}$ ) выходами газов. То есть теплообмен здесь практически не идет.

Свободное и достаточно быстрое смешение в природе различных контактирующих вод, как холодных, так и вод разных температур, тоже не подтверждается прямыми наблюдениями. Даже пребывая в контакте, природные воды очень долго хранят свою индивидуальность, словно между ними существует невидимая пленка. Не смешиваются, например, теплые воды Гольфстрима со своими водными “берегами”, горячие растворы дна Красного моря с окружающими морскими и т.д., уже не говоря о несоответствии составов холодной и якобы нагретой вод [Арсанова, 1974]. Причин такого поведения несколько и одна из них состоит в том, что вода обладает огромным поверхностным натяжением, уступая по этому параметру только ртути. Молекулы ее наружного слоя, сцепляясь, создают упругую внешнюю пленку, которая стремится

сократить поверхность и противостоит разрыву. Струя воды сечением 1 см<sup>2</sup> по прочности на разрыв не уступает стали того же сечения.

Такой, казалось бы, простой вопрос оказался очень важным ввиду распространенности и стойкости заблуждений об очевидности нагрева и смешения вод разных температур и составов, как способа образования вод разнообразных типов. Возможно, в отдельных редких условиях такие процессы и происходят, но их реальность в природе надо каждый раз доказывать.

Причину высокой температуры природной воды и ее динамику (нагревается она или остывает) показывает наличие в ней газов при выходе на поверхность. В водном флюиде газы очень хорошо растворяются; в горячей воде — нет. Если природная вода — горячая и при этом ее активно покидают газы, значит, это остывающая вода. Нагретая вода прошла дегазацию уже в процессе нагрева.

Правда, иногда вулканические газы способны превратить небольшой объем метеорной воды в кратерах в пеструю смесь горячих и теплых кислот, но это другой механизм. Здесь газы длительно химически взаимодействуют с ограниченным объемом воды.

Таким образом, сопоставление свойств воды в ее разных формах и фазах с непосредственными наблюдениями различных природных водных объектов показывают следующее:

- холодные, окружающие вулканические постройки, воды не проникают в действующий вулканический канал;
- холодная вода не может превратиться в водный флюид (СК<sub>n</sub>О) путем ее нагрева среди реальных кристаллических пород коры, так как в природе для этого не создается соответствующих условий;
- наличие или отсутствие дегазации горячей воды на выходе есть указание на ее генезис. Активная дегазация характерна для остывающего флюида. Если же вода стала горячей через нагрев, то она уже дегазирована;
- можно сказать, что в процессе вулканизма участвует природная вода двух видов: активная глубинная, поступающая вместе с расплавом, и холодная поверхностная, которую активируют во время извержений вулканические подвижки и нагрев (выплескивающиеся кратерные озера, тающие снежники и т.п.). Смешиваются они уже на поверхности после извержений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ свойств СКФ и наблюдения хода извержений позволяют говорить не только о высокой роли воды в выносе на поверхность расплава силикатов и образовании специфических

вулканических продуктов, что действительно имеет место, — расширяются наши представления о природе магматизма.

Воду и расплав силикатов можно считать составными частями магмы, а магму — их условной “смесью”, но только в отношении магм верхней части вулканического канала до глубин порядка 5–10 км. Структура материи в корнях вулкана и у поверхности с неизбежностью должна кардинально отличаться, из чего следует последовательное ее изменение по высоте канала и, следовательно, последовательное изменение формы сосуществования воды (или праводы) и силикатов (или прасиликатов).

Едва ли стоит спешить с обобщающей геологической гипотезой. Согласно законам эволюции и самоорганизации сложных систем [Князева, Курдюмов, 1994 и др.], геологические структуры и процессы, будучи одними из самых сложных, реализуются чрезвычайно избирательно. Считается, что строятся они по единому принципу, но он широко варьируется способами. Однако одним из общих правил их развития является постоянная перестройка вещества на микроуровне за счет собственной внутренней энергии [Пригожин, Стенгерс, 1986]. Магма в канале, судя по всему, иллюстрирует именно это положение и можно только догадываться о ее меняющихся и парадоксальных свойствах на пути подъема: она “строит” жесткий канал среди жестких пород и при этом по нему “течет”.

На поверхности, “умирая” как магма, она превращается в разобшающиеся дифференциаты, из которых закристаллизовавшееся твердое вещество изучается всесторонне, а вода быстро рассеивается и практически остается изученной не достаточно. Мы почти не знаем колебания температуры дождей во время извержений, их связь с извержениями, их макро- и микростав, а также состав воднорастворимой части свежих пеплов и т.п. Не сложно предположить, что это та же самая вода, которая будучи в иной форме и условиях, “работает” как метаморфизирующий и рудообразующий флюидо-раствор [Арсанова, 2016] и дает начало термальным водам [Арсанова, 2014], поэтому так важно ее всестороннее изучение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арсанова Г.И.* К вопросу о происхождении перегретых хлоридно-натриевых вод молодых вулканических областей // Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука, 1974. С. 14–21.
- Арсанова Г.И.* К геохимии цезия: источник цезия в термальных водах и кислых вулканиках [Электрон-

- ный ресурс] // Электронное научное издание “Альманах Пространство и Время”. 2013. Т. 4. Вып. 1. Система планета Земля. Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-arprovt\_e-ast4-1.2013.23.
- Арсанова Г.И.* Происхождение термальных вод вулканических областей // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 44–58.
- Арсанова Г.И.* Цезий как индикатор ювенильного флюида и многофункциональность флюида [Электронный ресурс] // Электронное научное издание “Альманах Пространство и Время”. 2016. Т. 11. Вып. 1. Система планета Земля. Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-arprovt\_e-ast4-1.2013.23.
- Белоусов А.Б.* Эксплозивные извержения вулканов Курило-Камчатского региона: механизм, динамика, закономерности образования отложений / Автореф. дисс. ... доктора геол.-мин. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2006. 42 с.
- Большое Трещинное Толбачинское извержение (БТТИ) / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 638 с.
- Галкин А.А., Лунин В.В.* Вода в суб- и сверхкритическом состояниях — универсальная среда для осуществления химических реакций // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 1. С. 24–40.
- Горбатый Ю.Е., Бондаренко Г.В.* Сверхкритическое состояние воды // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2007. Т. 2. № 2. С. 5–19.
- Гордеев Е.И., Карнов Г.А., Аникин Л.П. и др.* Алмазы в лавах трещинного Толбачинского извержения на Камчатке // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 1–3.
- Григорьев Н.А.* Распределение цезия и цезиевых макси-минералов в верхней части континентальной коры // Литосфера. 2008. № 6. С. 87–93.
- Жузе Т.П.* Роль сжатых газов как растворителей. М.: Недра, 1981. 165 с.
- Залепугин Д.Ю., Тилькунова Н.А., Чернышова И.В. и др.* Развитие технологий, основанных на использовании сверхкритических флюидов // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2006. Т. 1. № 1. С. 27–51.
- Карнов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П. и др.* Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 3–20.
- Киржниц Д.А.* Экстремальные состояния вещества // Успехи физических наук. 1971. Т. 104. Вып. 3. С. 489–508.
- Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М.: Наука, 1994. 236 с.
- Кочетков А.В., Федотов П.В.* Фазовая диаграмма воды // Интернет-журнал “Науковедение”. 2016. Т. 8. № 4. <http://naukovedenie.ru/PDF/38TVN416.pdf>
- Леменовский Д.А., Баграташвили В.Н.* Сверхкритические среды. Новые химические реакции и технологии // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 36–41.
- Леменовский Д.А., Бруслова Г.П., Тимофеев В.В. и др.* Вторая молодость известного явления // Природа. 2006. № 6. С. 42–48.
- Мальшев А.И.* Жизнь вулкана. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 262 с.
- Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. М.: URSS, 2014. 344 с.
- Озеров А.Ю.* Динамика эруптивной деятельности, эволюция магм и модели базальтовых извержений (на примере Ключевского вулкана) // Дисс. ... доктора геол.-мин. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2016. 410 с.
- Пригожин И.Р., Стенгерс И.* Порядок из Хаоса: Новый диалог человека с Природой. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
- Слезин Ю.Б.* Механизм вулканических извержений (стационарная модель). М.: Научный мир, 1998. 124 с.
- Соболева Е.Б.* Термогидродинамика сверхкритических флюидов при наличии температурных неоднородностей // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2013. № 4. С. 62–77.
- Степин В.С.* Саморазвивающиеся системы и философия синергетики // Экономические стратегии. 2009. № 07. С. 24–35.
- Суслов В.А.* Теплообмен. СПб.: ГОУ ВПО СПбПУРП, 2008. 120 с.
- Тазиев Г.О.* Запах серы. М.: Мысль, 1980. 222 с.
- Тазиев Г.О.* О механизме фреатических извержений // Проблемы глубинного магматизма. М.: Наука, 1979. С. 70–75.
- Титаева Н.А., Ермаков В.А., Зазуля Т.А. и др.* Геохимические типы базальтов Большого Трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Петрологические исследования базитов островных дуг. М.: Наука, 1978. С. 69–109.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.* О деятельности, магматической питающей системе и глубинном строении Ключевской группы вулканов // Вулканизм и геодинамика. Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и сейсмологии. Петропавловск-Камчатский, 2009. С. 24–27.
- Филенко Д.Г., Дадашев М.Н., Винокуров В.А. и др.* Сверхкритическая флюидная технология в нефтепереработке и нефтехимии // Вести газовой науки. 2011. Вып. 2(7). С. 82–92.
- Фортон В.Е.* Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН. 2007. Т. 177. № 4. С. 347–368.
- Фортон В.Е.* Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе // УФН. 2009. Т. 179. № 6. С. 653–687.
- Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. М.: Наука, 2001. 105 с.
- Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 279 с.

**THE ROLE OF WATER IN VOLCANISM****G. I. Arsanova***Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Bul'var Piipa 9,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia**e-mail: agi888@list.ru*

Received September 21, 2017

Water plays an extremely important role in volcanism: it acts as an evacuator of viscous melts in a variety of ways, which is ensured by the presence of relevant properties of its phase states, which successively changing with the fall of the environmental parameters. In this sense, the supercritical (fluid) state of water is especially significant. The paper provides a summary of fluid properties that are unique in many ways. The properties determine the relationship between water fluid and silicate melt, which in turn explains the cause of volcanic phenomena and the course of eruptions: explosions of different power, the emergence of the so-called fluidized mass, scorching clouds, landslides and breakthroughs on the slopes, the formation of ignimbrites, as well as the mechanism of gas transport to the foot of volcanoes. Both by role and quantity, water is the main volcanic substance, which together with the silicate melt constitutes magma.

**Key words:** fluids, properties of fluids, volcanoes, eruptions, magma.