

EARTH SCIENCES

СВЕРХКРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДЫ КАК ПРИЧИНА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Арсанова Г.И.

*кандидат геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник,
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

SUPERCRITICAL STATE OF WATER AS A CAUSE OF GEOLOGICAL PHENOMENA

Arsanova G.

*Ph.D. in Geologo-mineralogical sciences,
senior researcher Officer
Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*

Аннотация

Особенности динамики вулканических извержений впервые объясняются как следствие свойств высокотемпературных фаз воды и их переходов. Приведены некоторые свойства воды в сверхкритическом (флюидном) состоянии. Последние определяют характер взаимоотношения воды и расплава в вулканическом процессе, что в свою очередь, объясняет взрывы разной мощности, стремительность палящих туч, перенос газов к подножью вулканов, прорывы и оползни на склонах, возникновение пеплов, пемз, псевдоожиженной массы, а также возможно игнимбритов и вулканических стекол. Показана невозможность проникновения холодных вод в действующий вулканический канал, а также их высокого нагрева (до смены фазы) в условиях коры.

Abstract

Features of the dynamics of volcanic eruptions for the first time are explained as a consequence of the properties of high-temperature phases of water and their transitions. Some properties of water in supercritical (fluid) condition are given. The latter determine the nature of the relationship between water and melt in the volcanic process, which in turn explains the explosions of different power, the rapidity of scorching clouds, the transfer of gases to the foot of volcanoes, breakouts and landslides on the slopes, the occurrence of ash, pumice, pseudo-liquefied mass, as well as possibly ignimbrites and volcanic glass.

It shows the impossibility of penetration of cold water into the active volcanic channel, as well as their high (before the change of phase) heating in the conditions of the crust.

Ключевые слова: сверхкритическое состояние воды в природе, сверхкритическая вода и продукты вулканизма, палящие тучи и сверхкритическая вода, происхождение сверхкритической воды недр, вулканические взрывы как фазовый переход воды.

Keywords: supercritical state of water in nature, supercritical water and products of volcanism, scorching clouds and supercritical water, the origin of supercritical water in the subsoil, volcanic explosions as a phase water transition.

Введение

Взаимоотношения силикатов и воды определяют ход многих геологических процессов и их продукты, и поэтому знание их особенностей - важно, особенно при очень высоких параметрах P (давления) и T (температуры), которые имеют место в вулканическом процессе. В вулканологии воду принято относить к так называемым летучим компонентам магмы, и часто она составляет их почти полностью (до 99%), редко опускаясь до 70-80%. До десятой части от летучих приходится на CO_2 . Прочие газы обнаружены в десятых, сотых и меньших долях от CO_2 и представлены: CO , H_2S , SO_2 , H_2 , N_2 , CH_4 , NH_3 , HCl , HF , благородными газами, S и летучими соединениями металлов.

Оценка количества летучих по отношению к извергаемым базальтовым магмам была сделана на Большом Трещинном Толбачинском извержении (БТТИ) [Федотов, 1984], где оно дано для Северного прорыва как 9% по массе, а для Южного - как 4.5%.

Считается, что основной вулканический материал - это силикатные магмы. (Карбонатная магма известна на единственном вулкане Танзании, и данный случай здесь не анализируется.) Летучие, то есть в основном - воду, традиционно относят к растворенным добавкам; допускается даже частично коровый её источник.

Так ли это? Как влияет вода на динамику извержений? Что известно о собственных свойствах воды при высоких параметрах геологических процессов?

Еще в 1822 году Cagniard de Latour экспериментально установил, что при определенном достаточно высоком P и определенной T газы превращаются в нечто похожее на жидкость, что потом стали называть флюидом. Параметры перехода - индивидуальны для разных газов, а точку перехода назвали критической, или точкой de Latour. Изучать свойства флюидов, особенно водного, из-за больших технических сложностей долго не удавалось,

но положение изменилось в последние десятилетия, после того, как флюиды начали исследоваться для нужд промышленности.

Очевидно, что свойства флюидов и преимущественно - водного, лежат в основе причин ряда геологических процессов, что делает их знание чрезвычайно важным для геологии. В геологии нефти вещества во флюидной фазе известны как сверхкритические растворители [Филенко и др. 2011]. В геохимической литературе словом «флюид» или производными от него называют многокомпонентное глубинное горячее водное вещество, чтобы подчеркнуть его текучесть и присутствие воды как основного составляющего. Но определение понятия «флюид» - отсутствует, параметры существования флюидов, как и их свойства, - не приводятся, что делает невозможным создание корректных моделей геологических процессов с участием воды во флюидном состоянии. Однако в физике различные данные о структуре и свойствах флюидов начали появляться в отдельных работах последние пару десятков лет. Геология, как наука, нуждается в однозначности использования понятия «флюид», а также в знании параметров существования флюидов и их свойств.

В физике флюид понимается как фазовое состояние вещества, которое называют сверхкритическим состоянием, или сверхкритикой, или флюидом, или СКФ. Англ.: supercritical fluid, или supercritical, или SCF, а для конкретного вещества с указанием формулы: SC_{H_2O} означает сверхкритический водный флюид; SC_{CO_2} – сверхкритический флюид диоксида углерода и т.д. В настоящей работе понятие флюид используется как фазовое состояние; приняты обозначения SCF, SC_{H_2O} , SC_{CO_2} .

Если флюиды и особенно - водный, действительно участвуют в геологических процессах, то их свойства должны коррелировать с природными процессами и прежде всего, – с вулканическими явлениями.

Свойства флюидов и вулканические явления как их следствия

В ходе некоторых вулканических извержений масса извергнутого пара бывает настолько велика, что возникает мысль о присутствии в канале помимо растворенной еще какой-то формы воды. Формой, совместимой с параметрами среды, может быть водный флюид, но насколько он возможен здесь согласно собственным свойствам?

Однозначного определения физического состояния среды, именуемой флюидом, в научной литературе не дано, но известно, что флюиды имеют свойства и жидкости и газа, не будучи ни тем, ни другим. Флюиды возникают и существуют при критических (и выше) параметрах P и T для конкретного вещества (обозначаются как P_c и T_c). Флюиды разного состава активно смешиваются; критические параметры смеси рассчитываются как их среднее арифметическое. Для воды $T_c + 374^\circ C$; P_c 218 bar (22 МПа). Для диоксида углерода $T_c + 31^\circ C$; P_c 73 bar. Значит, критические параметры воды с добавкой диоксида углерода будут ниже, чем у воды.

Присутствием других газов из-за их низкого содержания в общем случае можно пренебречь.

Известно несколько работ, посвященных исследованию структуры воды в сверхкритическом состоянии [Горбатый, Бондаренко 2007; Кочетков, Федотов 2016; Christoph J. Sahle и др. 2013], которые позволяют судить об устойчивости воды, как такой, на разных глубинах Земли, однако геологу, анализирующему природные явления, прежде всего необходимо знание свойств и характеристик SCF. Далеко не все они известны и пока не систематизированы одной сводкой, однако по сумме данных из отдельных работ уверенно можно указать нижеследующие свойства и характеристики, высоко значимые для понимания природных процессов:

✓ Крайне низкая вязкость флюидов, дающая им очень высокую подвижность и химическую активность.

✓ Супер активное движение молекул, что обеспечивает смешивание различных SCF друг с другом и с другими жидкостями, в том числе с расплавом, причем между расплавом силикатов и флюидами возможен обмен компонентами.

✓ Способность сжиматься, свойственную газам, но не свойственную жидкостям.

✓ Эффективную растворяющую способность, которая контролируется давлением, и свойственна жидкостям, но не свойственна газам: SC_{H_2O} принимает в себя и переносит вещества, практически нерастворимые в жидкой воде в обычных условиях (силикаты, оксиды, сульфиды и другие), что означает для SC_{H_2O} невозможность находиться в толще реальных пород, не разрушая их, подобно водным растворам.

✓ Быстрое отделение (сброс) веществ, смешанных с SCF с резким падением давления, что возможно, объясняет способ образования некоторых вулканических возгонов по аналогии со сбросом кофеина SC_{CO_2} , которым ранее обработали кофейные зёрна.

✓ Проникновение (диффузия) в пористые среды, значительно более легкое, чем у жидкой воды, так как у флюидов намного выше адгезия (сцепление поверхностей разнородных тел).

✓ У флюидов очень низкая когезия (внутреннее межмолекулярное притяжение), которая в сочетании с высокой адгезией обеспечивает быстрейший массоперенос частиц, находящихся в контакте с SC_{H_2O} , что ведет к оползням и горизонтальным подвижкам рыхлого насыпного вулканического материала.

✓ Высочайшую способность поглощать газы и транспортировать их растворенными, в отличие от горячей воды, где газы не растворяются, что очень важно при анализе генезиса природных источников горячих вод, а также для понимания отравляющих свойств палящих туч и других подобных явлений.

✓ В водной флюидной среде очень быстро протекают реакции окисления и образования сложных углеводородов из-за её способности неограниченно смешиваться с кислородом, водородом и углеводородами, облегчая их взаимодействие между собой,

что может объяснить генезис природных углеводородов. [Жузе, 1981; Леменовский, Баграташвили, 1999; Галкин, Лунин, 2005; Залепугин и др. 2006; Горбатый, Бондаренко, 2007; Соболева, 2013 и др. работы].

Свойства воды в условиях выше критических параметров (во флюидной фазе) резко отличаются от её привычных свойств до них, причем в значительной мере, чем для других веществ. Если при нормальных P и T вода – это полярный растворитель, то как флюид она становится практически неполярной средой и сильнейшим окислителем. У неё меняется структура водородных связей, вследствие чего растет диэлектрическая проницаемость, электропроводность и ионное произведение, что определяет электрические, магнитные и другие свойства среды с SC_{H_2O} . Судя по всему, именно это есть причина множества молний, сопровождающих извержения, а также наэлектризованности атмосферы и огней святого Эльма на судах, попавших под пеплопад.

Необходимо подчеркнуть, что свойства водного флюида не дают ему возможность быть пластовым или межпластовым текучим компонентом горных пород подобно водным растворам. Он активно вступит с ними в реакции, то есть не сможет «мирно» мигрировать. Место его существования, даже не слишком длительного, должно быть достаточно изолированным, и условия вулканического канала, судя по всему, здесь подходят.

Зная свойства SCF , можно предвидеть, каким образом SC_{H_2O} будет взаимодействовать с расплавленными силикатами в вулканическом канале:

Известно, что растворимость воды в силикатах – ограничена, но SC_{H_2O} может смешаться с расплавом в любых количествах: таково его свойство. При этом сам SC_{H_2O} будет иметь и какое-то количество силикатов растворенными. Поэтому существование в вулканическом канале при высоких параметрах расплава силикатов с растворенной водой и SC_{H_2O} с растворенными силикатами не лимитируется отношением $H_2O/$ силикаты (где H_2O – общая вода).

Теоретическое обоснование возможности любого соотношения $H_2O/$ силикаты в вулканическом канале является важным геологическим выводом, так как снимает ограничение количества воды в связи с магматическими расплавами.

Требуется уточнения и само понятие магма. Традиционно магма понимается как силикатный расплав с растворенными летучими. Но этот расплав с

растворенными летучими может быть еще и перемешан с водным флюидом. Структура такой «смеси» – не вполне ясна. По-видимому, расплав и флюид сосуществуют в канале в виде вытянутых по ходу движения молекулярных кластеров («капель») силикатов и воды разной величины, которые могут еще и двигаться относительно друг друга.

Современные модели мощных вулканических взрывов, начиная еще с гипотезы Верхугена середины прошлого века, связывают их причины с накоплением в апикальной части канала диффундирующих через расплав пузырьков бывшего растворенного газа. Например, согласно Ю.Слэзину [2001] задача описания процесса извержения сводится «к описанию потока дегазирующейся магмы в канале вулкана под действием перепада давлений».

Но возможен и другой механизм. Более вероятной причиной взрывов представляется фазовый переход « $SC_{H_2O} \rightarrow$ газ». Он хорошо объясняет серию предшествующих взрыву последовательных процессов. А именно: хорошее смешение расплава с SC_{H_2O} , возникновение с фазовым переходом газов сразу во всем объеме такой «смеси», вспенивание и диспергация материала канала в мельчайшие частицы, резкое их охлаждение (из-за расширения!), отверждение и выброс в напорной газовой струе силикатного материала в виде пеплов и пемз. Внешне процесс подобен кипению расплава. Магма дробится возникающими во всей её массе газами в пену, рвется в пудру, превращается в пористые бомбы и т.п. При такой модели для взрыва не требуется предварительного перехода газов из растворенного состояния в свободное, энергии на подъем вязкого расплава, времени и места для накопления газов, а также и очагов как мест их аккумуляции. Кстати, очаги только предполагаются по геофизическим аномалиям, но их существование, как и их функциональная необходимость, однозначно не доказаны. Более того – всесторонним обследованием мощнейшего вулкана Камчатки Ключевской сопки [Озеров 2019] промежуточные очаги обнаружены не были.

Критическая температура существования водного флюида ($+374^\circ C$) не столь велика: вулканические продукты, даже на поверхности, имеют значительно более высокие температуры, поэтому управляющим параметром фазового состояния H_2O в канале чаще будет P , с падением которого флюиды превратятся в газы, а силикатный расплав – вспенится. На диаграмме рис. 1 фигуративная точка из области «supercritical» переместится вниз в поле газа.

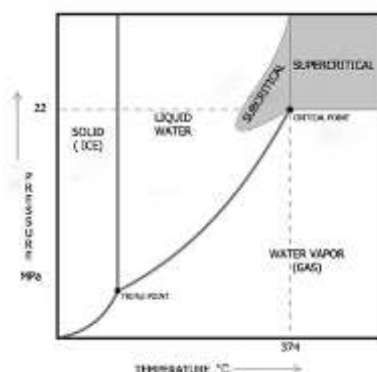


Рис.1 Упрощенная фазовая диаграмма воды

Но в природе так происходит не всегда. Первые порции вулканического материала могут подниматься по еще непрогретому каналу и успеть остыть. Поэтому следует ожидать фазового перехода SC_{H_2O} и на фоне снижающейся T . Тогда SC_{H_2O} превратится в «перегретую» воду: фигуративная точка (рис.1) из области «supercritical» пойдет влево к полю жидкой воды. В этой части диаграммы она прежде попадает в область «subcritical», что означает сохранение флюидного состояния при параметрах более низких, чем критические. Границы «supercritical» и «subcritical» - размыты и сам фазовый переход здесь постепенный из-за особенностей состояния вещества в этой области. Переход флюида в жидкую «перегретую» воду, судя по всему, случился при извержении в. (*здесь и далее – вулкан*) Мон-Пеле (ниже).

Правомерен вопрос: Если флюиды химически столь высоко активные вещества, то - как они удерживаются в вулканическом канале со стенкой из силикатов? Теоретически это можно объяснить так: Проникая в стенку канала и двигаясь к её холодной периферии, флюид остывает, и на каком-то расстоянии с фазовым переходом становится жидкой водой. С превращением он меняет свойства и его движение прекращается. Следовательно, условием существования флюида в центральной части вулканического канала является мощная стенка этого канала (не считая других её особенностей!) и, если она окажется меньше необходимой, флюид сможет сквозь неё проникнуть. И такое явление действительно происходит на вулканических постройках при извержениях (ниже). По геологическим и расчётным данным диаметр каналов средних вулканов центрального типа в земной коре равен 100—200м [Действующие вулканы Камчатки 1991, т. 1, с. 26]. Стенка канала не может быть резкой и жесткой; скорее она представляет собой широкую область постепенного перехода от жидкого до твёрдого состояния того же вещества, которое поднимается по центру канала. Это объясняет при необходимости и лёгкость «ремонта» канала.

Критическое давление воды в 218 бар (22 МПа) приблизительно соответствует литостатическому на глубине порядка 7-8 км и, казалось бы, это дает основание утверждать, что природного водного флюида на поверхности быть не может. Однако на самом деле до поверхности он доходит (ниже). Это

обусловлено тем, что давление в вулканическом канале не определяется литостатическим, хотя как-то с ним связано. А также тем, что фазовое состояние H_2O отвечает на изменившиеся параметры среды не сразу и не всем объемом.

О глубинном состоянии воды

А каково может быть состояние воды в канале глубже 7-8 км? Данных об этом очень мало, и высказать можно только предположения.

Принято считать, что до самых «корней» вулканической структуры вещество канала представлено всё той же магмой, под которой понимается силикатный расплав с растворенными летучими. Допускается, что с подъемом «магма дифференцируется и смешивается в различных отношениях с другими расплавами в гипотетических очагах, образуя систему взаимосвязанных очагов». Например, работа [Федотов и др.2009] по Ключевской группе вулканов, где выводы сделаны «на основании методов вулканологии, сейсмологии, геодезии и математического моделирования».

Однако, если принять современные представления физики о состоянии вещества в условиях высокой плотности энергий, оцененные В.Фортовым как надежные [Киржниц 1971; Фортов 2009], то, похоже, 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], что позволяет допустить, что постоянное воздействие сможет «сломать» молекулы и при более низком давлении. Уже свойства астеносферы, куда, как предполагают [Горшков, 1956], «уходят корни» вулканов, говорят об ионизированном состоянии вещества там. Вопрос структуры воды при высоких параметрах P и T во многом дискусионен, но известно, что уже вблизи критической точки большая часть водородных связей оказывается разорванной [Christoph J. Sahle и др. 2013]. Поэтому нет уверенности даже в самом существовании молекулы воды на уровне «корней» вулканов.

Хотя состояние материи на таких глубинах – неясно, однозначно то, что это – не молекулярный

силикатный расплав с растворенными летучими, то есть – не магма в её традиционном понимании. Тогда, между этой «не магмой» и магмой у поверхности с необходимостью лежит путь фазовых переходов и глубокой трансформации вещества: последовательно должны исчезать атомарные формы, появляться и поэтапно усложняться молекулярные, новые молекулы через серию промежуточных форм превращаться в новейшие... и так до поверхности.

Согласно данным А.Озерова [2019] 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 supercritical параметров, и их продукты не просто сложны – они принципиально иные, не похожие на все известные. По мнению специалистов [Леменовский и др.2006; Фортов 2007, стр.357], работающих с веществом в supercritical состоянии, их невозможно предсказать – настолько они необычны.

Можно подойти к проблеме с другой стороны: посмотреть на ВУЛКАН в свете современных синергетических концепций [Стёпин,2009], как это предлагают ведущие специалисты в этой области, например Е.Князева и С.Курдюмов [1994]. С этих позиций геологическое образование ВУЛКАН предстает как самоорганизующаяся природная динамичная диссипативная структура, обладающая как таковая 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 и увеличением объема. Переходные молекулярные формы промежуточного состава будут более разуплотненными и более сложными по структуре и составу, причем следует ожидать, что изменения будут отставать (гистерезис) от снижающихся параметров среды. Отставание действительно можно заметить по свежеизвергнутому материалу на поверхности: в нем продолжают идти внутренние реакции, сопровождающиеся разогревом (ниже).

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; Чернавский, 2001; Хакен, 1991; Эбелинг, 1979; Николис, Пригожин, 2014 и др.] Обратимость свойство замкнутых систем; природные системы открыты.

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

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

Объяснения внутреннего строения Земли через анализ геофизических аномалий тоже не прибавляет уверенности. Геоологический смысл геофизических аномалий выясняют (анализируют, пытаются понять) на материале, имеющем молекулярную структуру при невысоких («нормальных») Р и Т. «За неимением гербовой...» полученный опыт

«За неимением гербовой, пишем на простой.»
русская поговорка.

распространяют на всю глубину Земли. Но прямое сопоставление геофизических аномалий с составом по результатам бурения сверхглубоких (только 7-12 км!) скважин [Попов, Кременецкий, 1999] показало, что волновая картина, фиксируемая сейсмическими методами, не отражает изменение состава. Можно сказать, что уверенность в замерах геофизических аномалий – есть, но нет достаточно убедительного понимания их геологического смысла.

По-видимому, следующий шаг в понимании глубинных зон Земли нам предстоит сделать через анализ структуры самой материи. Геолог всегда имел дело с материей в электронно-ядерной форме; такой она существует в привычном для нас мире. Но материи в такой форме на больших глубинах Земли по данным современной физики - нет [см. например, Фортов 2009]. Высокое давление дезинтегрирует связанные комплексы. С глубиной исчезают («ломаются») сначала молекулы, а затем перестраиваются атомы, ионы, ядра, нуклоны и другие частицы.

Вышеизложенное есть причина отсутствия удовлетворительной понятийной модели вулканического процесса, а без неё математические (физические) модели, особенно построенные без достаточного учета полевого опыта, не более, чем упражнения в счете: пока они описывают математическим языком «геологических химер», или то, чего в природе не существует. Более того: строятся они только для верхней части вулканической структуры. Или, образно говоря, для хобота, вне учёта слона. Однако попытки создания физических и математических моделей делаются, и будут делаться. Основная трудность на этом пути - учет перманентно меняющихся с глубиной свойств отнюдь не гомогенной магмы, но очень сложной и – нетрудно предвидеть! – неожиданно незнакомой. Свойства этой глубинной магмы-инкогнито контролируют применимость предлагаемых моделей.

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 глущинных форм. В этом особая ценность наблюдений и геологических находок на БТТИ [Федотов, 1984], как и на других действующих вулканах.

Вода – активное вулканическое вещество

Чтобы оценить роль воды в вулканизме, сопоставим свойства разных форм и фазовых состояний воды с особенностями вулканических явлений на извержениях.

Рождение вулканов (наблюдалось только базальтовых) начинается с предваряющих землетрясений, иногда сопровождаемых гулом. Участок воздымается, и возникает трещина, из которой первыми являются белые пары; затем обычно следуют выбросы пепла. Лава, как правило, изливается позже, что само по себе показательно. Видимые пары не могут быть нагретыми местными вадозными водами, если только лава не излилась в водоем. Поднимающееся глубинное вещество меняет наклон пород во все стороны от рождающегося вулкана: холодные воды оттесняются на периферию. Если вдруг соприкосновение холодной воды с горячей магмой состоялось, то вода мгновенно превращается в пар, давление увеличивается, и подступающие порции холодной воды отбрасываются. Вокруг растущего вулканического конуса образуется область просушки. Поэтому пары, видимые при рождении вулкана, представляют собой воду глубинную, поднимающуюся вместе с магмой.

И растворенная вода магм, и смешанный с расплавом водный флюид снижают вязкость магм своим присутствием, но флюид способен еще и быстро диспергировать расплав с превращением его в супер подвижную псевдооживленную (fluidised) массу. Наблюдать эту массу (издалека!) можно только в ходе извержений: с остыванием она превращается в пеплы, пемзы, пар и жидкую воду, а вернуть ей прежний вид и свойства - уже невозможно.

Явление есть следствие свойств воды и силикатов. Как SCF, вода с расплавом смешивается; став газом, она его рвет (диспергирует). При этом не весь флюид разом меняет фазу из-за особенностей фазового перехода в этой области диаграммы воды. Остатки флюида выступают в роли очень скользкой смазки для твердеющих силикатных частиц.

Со своей стороны - силикаты в форме пеплов обладают множеством внутренних полостей, трещинок и капилляров, что увеличивает глубину диффузии в них флюида – вещества обладающего очень низкой когезией при высокой адгезии. Благодаря этим свойствам смесь пеплов с SC_{H_2O} и становится как бы оживленной массой, более мобильной, чем расплав. Последний с остыванием свою вязкость только увеличивает. Это вероятно и объясняет отставание в начале извержений расплава от пеплов.

Свойства SCF хорошо объясняют динамику форм «новорожденных» конусов при остывании: их горизонтальные перемещения вплоть до отторжения и проседания отдельных участков. Явления наблюдались при БТТИ [Федотов, 1984].

Превращение SC_{H_2O} в жидкую воду (в более вязкое вещество с высоким поверхностным натяжением, которое почти отсутствует у флюидов) сопровождается её стягиванием, стремлением собраться в объем с минимальной поверхностью. Поэтому с остыванием частицы пепла, при возникновении «перемазанные» флюидом, теперь прижимаются друг к другу, и бывший мобильный материал становится плотным пластом, похожим на мокрый песок.

Ранее, по аналогии с поведением обычных песков, допускалось, что в динамике пепловых конусов участвуют дожди. Обычный песок иногда ведет себя как зыбучий, но только, при подтоке снизу и округлых частицах. Частицы пеплов – скорее остроугольны, а дожди поступают сверху, что исключает их участие в динамике пепловых конусов.

Диспергирование расплавов флюидами, по-видимому, вообще способ ликвидации непроходимостей канала в вулканическом процессе, и можно предположить, что оно идет не только у поверхности, но и на малых глубинах в канале. Возможно, его следствием был таинственный белый пепел на БТТИ; не исключено, что таково начало образования игнимбритов.

Участие SC_{H_2O} в эвакуации на поверхность расплава изредка удается наблюдать по влажности свежих 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 в Мон-Пеле 08.05.1902, «на нас повалил горячий влажный пепел» (из газет).

Атмосферная влага не может конденсироваться на пеплах, так как пепел теплее её. Так как теплоемкость воды в несколько раз (~ в 4) выше теплоемкости силикатов, пепел в атмосфере охладится раньше одновременно исторгнутой с ним воды, и последняя осядет на пепловых частичках, от которой они и станут мокрыми. Люди, попавшие под извержение в Тааль 30.01.1911, вспоминают: «Полминуты шел легкий теплый дождь». Вулканологам, работающим на извержениях, хорошо знакомы кратковременные теплые дожди. Высокая теплоемкость воды указывает на то, что это - не нагретая вода, но вода - еще не охладившаяся, то есть - не атмосферная, а - глубинная, или бывший SC_{H_2O} .

Наряду с извержением пеплов, случаются и предваряющие основной взрыв огромные выбросы кипящей «перегретой» воды (по смыслу правильной - «недоостывшей»). За 2 недели до катастрофического взрыва в Мон-Пеле 08.05.1902, на его вершине возникло кипящее озеро, с десятиметровым фонтаном кипящей воды. Направление перемещения фигуративной точки (рис.1) показывает, что в данном случае фазовый переход случился на фоне снизившейся температуры, но при высоком давлении. Следствием же высокого давления в районе конуса являются катастрофические взрывы. Поэтому появление жидкой «перегретой» воды на вершине вулканической постройки следует считать

грозным прогностическим признаком. Этот признак говорит о (1) большой доле воды в поднимающемся вулканическом материале (много «взрывчатки») и о том (2), что вода достигнет поверхности во флюидной фазе, то есть в состоянии очень далёком от равновесия. Следствием этих двух моментов будет сильнейший взрыв и извержение палящих туч - одного из самых опасных вулканических явлений.

Палящая туча представляет собой стремительный поток смеси пирокластических обломков и всевозможного увлеченного материала, который «перемазан» и пронизан супер скользким SC_{H_2O} . Последний не только «липуч», скользок и горяч, но еще и лёгок (плотность водного флюида в критической точке - 322 кг/м^3), что обеспечивает высочайшую скорость перемещения (не убежать!). Уже у подножья вулкана, часто в местах поселения людей, SC_{H_2O} меняет фазу и сбрасывает растворенные газы в атмосферу, где они действуют как отравляющие, разом (одним вздохом!) унося сотни тысяч жизней.

Когда в составе магмы очень высоко отношение флюида к расплаву, то меняется сам характер извержений: прелюдией к вулканическим взрывам становится проникновение в верхнюю часть насыпной вулканической постройки самого флюида. Его сверхнизкое поверхностное натяжение и высокая диффузия позволяют ему проскользнуть сквозь стенку канала и далее (короткое время пока не остыл!) – внедриться в материал склонов. Удерживающее их трение резко падает, и материал срывается вниз. Происходят оползни, обвалы, и даже - прорывы склонов и извержения прямо из них.

Направленные взрывы со склонов и их боковые прорывы фиксировались на в. Тааль (Филлипины) 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» (из газет). Проникновение сквозь склон и обнаружение себя в виде «перегретого» пара и диспергированного расплава соответствует свойствам водного флюида.

Огромный объем SC_{H_2O} в течение нескольких лет извергался в. Катмай (Аляска). Извержение началось 06.06.1912 и образовало знаменитую Долину Десяти Тысяч Дымов (Valley of Ten Thousand Smokes), которая существовала несколько лет. Г.Тазиев [1979] считал, что «дымы» Долины представляют собой нагретые воды местной речной сети, но такой механизм едва ли принципиально возможен (ниже).

Слабое подобие Долины возникло в ночь с 30.06. на 01.07. 1985г после мощного извержения похожего на Катмай камчатского вулкана Безымянный. Здесь над руслом глубоко засыпанной снегом «сухой» речки снег прогорелся, накрывшим его пирокластическим потоком, и возникло множественное точечное парение разной интенсивности, вплоть до фреатических взрывов [Мальшев 2000, стр.84, рис.32]. Однако внешне похожее явление затихло всего через день-два, показав, что речная сеть может сотворить только очень слабое подобие Долины и

всего на пару дней, в то время как аляскинская Долина «дымила» годы.

Оползни и обвалы, «подмазанные» флюидом, наблюдались на в.в. Безымянный и Шивелуч [Мальшев, 2000, Белоусов, 2006], на в. Ламингтон (Нов.Гвинея) перед извержением 21.01.1951 г, при БТТИ. По той же схеме шло памятное извержение горы Св. Елены в Штате Вашингтон 18.05.1980. Сначала гору встряхнуло 5-ти бальное землетрясение, увеличив её трещиноватость. Это облегчило путь уже напиранию флюиду, ставшему смазкой для насыпного материала, и весь северный склон вулкана по ней съехал. Затем вулкан взорвалась.

Попытки объяснения оползней действием скопившихся метеорных вод [Белоусов, 2006] – едва ли корректны: на конусах нет мест, где бы метеорные воды могли задержаться, и нет глин. К тому же - оползни не коррелируют с сильными дождями; они возникают за минуты перед извержениями. Косая направленность взрывов здесь определяется скорее не наклоном подводящего канала, а проникающими способностями SC_{H_2O} в сочетании с механической слабостью отдельных участков насыпных склонов.

Вышеизложенное дает основание предположить, что гипоцентры взрывов вулканов такого типа находятся в наземной части вулканической постройки или совсем у поверхности, а сами взрывы напоминают так называемые объемные взрывы, относящиеся к классу химических, где вместо реакции с кислородом воздуха происходит фазовый переход воды.

Свежие пеплы считаются в народе плодородными, что легко объясняется наличием на их поверхности солей испарившегося SC_{H_2O} . 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 [Арсанова, 2013], такое содержание элемента однозначно говорит о флюиде, как его источнике и указывает на участии SC_{H_2O} в пеплообразовании.

Очень высокие содержания цезия (до 82.6 мг/л) были определены в конденсатах паров над магматическим расплавом Южного прорыва БТТИ [Федотов, 1984] 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 SC_{H_2O} . Скорее всего, все компоненты SC_{H_2O} сингенетичны с молекулой H_2O .

Можно предположить, что «прасиликаты» и «справода» возникают в корнях вулканической структуры одновременно как первые молекулярные формы магмы. С подъемом идет их трансформация и перераспределение элементов. Химические равновесия не устанавливаются из-за быстро меняющихся параметров, поэтому на лавовых потоках возможны реликтовые формы. К таким фор-

мам можно отнести находки углерода в виде графита и алмаза, а также - самородных металлов: Fe, Al, Cu, Zn, Sb, Au [Карпов и др.2014; Гордеев и др.2014].

При участии SC_{H_2O} , образуются вулканические стекла и игнимбриты, что видно по высокому содержанию в них редких щелочей: лития в игнимбритах (устное сообщение) и особенно - цезия в стеклах [Григорьев, 2008].

Подмечено, что особенностью свежеизвергнутого 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 $90^{\circ}C$ даже два года спустя» (из газет). Вторичный разогрев был подмечен на БТТИ, а еще ранее – вулканологом Б.Пийпом на лавах Ключевской сопки. Разогрев – явление известное; его причины – экзотермические реакции, но участвует ли в них воздушные газы или только извергаемый материал?

Воздушные газы ныне 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 [Суслов, 2008]. Теплофизика определяет тепломассоперенос как явление векторное. Направление определяется 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.

Горячие вулканические газы могут «языками» внедряться в атмосферу и затекать по поверхности в удаленные места (известны случаи отравления скота), но холодный воздух, по правилам теплофизики, не может «подтечь» к горячей вулканической постройке или «пронизать» её. Поэтому такие явления, как взрывы газов над конусом, газовые реакции над потоками лавы в горнитосах, а так же вторичный разогрев должны быть следствием экзотермических реакций самого вулканического материала, 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. Проблема требует серьезного обоснования и доказательств, так как вопрос напрямую связан с происхождением Земной атмосферы.

Итак, сопоставление характера вулканических явлений на извержениях со свойствами воды в разных формах (растворенная, свободная) и фазах (флюид, газ, жидкость) показывает что:

1. Соотношение H_2O /расплав магм возможно самое разное, так как львиная доля воды обеспечивается SC_{H_2O} и не лимитируется свойствами расплава и флюидов;

2. Количество воды магмы определяет потенциальную силу вулканических взрывов;

3. Появление жидкой «перегретой» воды на вершине вулканической постройки следует считать краткосрочным прогностическим признаком взрыва и палящих туч;

4. Множество вулканических явлений и их продуктов объясняется участием в них воды:

✓ Вода снижает вязкость магм своим присутствием, умеренно растворяясь в расплаве, и неограниченно смешиваясь с ним как SC_{H_2O} ;

✓ Как SC_{H_2O} вода диспергирует расплав в мельчайшие капли, обволакивает эти мелкие силикатные частицы своими остатками и создает мобильную, короткоживущую в поверхностных условиях псевдооживленную массу;

✓ Смена фаз «флюид→газ» предвещает взрывы всех мощностей и является их первопричиной;

✓ Как SC_{H_2O} вода обеспечивает перенос со скольжением пирокластики по поверхности в форме стремительной палящей тучи;

✓ Как SC_{H_2O} вода проникает сквозь стенку вулканического канала в материал насыпного конуса и создает оползни, обвалы, прорывы склонов и кратеры на них;

✓ Как SC_{H_2O} вода участвует в образовании игнимбритов и вулканических стекол, что подтверждается высоким содержанием в них редких щелочных элементов;

✓ Как SC_{H_2O} вода выносит и перемещает газы растворенными в составе палящей тучи, а со сменной фазы освобождает их, делая отравляющими, но уже у подножья;

Вышесказанное показывает, что как по роли, так и по количеству вода для «неглубоких» (до 5-10 км) магм, есть основное вулканическое вещество. (Глубже – состояние, состав и структура магмы – иные, но это еще предстоит изучать.) Вместе с расплавом вода составляет магму. Остывая, магма превращается в лаву, теряя при этом воду в окружающее пространство. Вторично расплавленная лава в магму не превращается, и подобрать в условиях земной коры процессы, которые могли бы вернуть воду в расплав силикатов, – не удастся (ниже). Судя по всему, – таких процессов не существует и вероятно не может существовать принципиально из-за необратимости природных процессов.

Об участии в извержениях холодных вадозных вод

О воде, как основном взрывчатом веществе в вулканизме по аналогии с паровым котлом, исследователи догадывались еще со времен взрыва в Кракатау в 1883г, а возможно и раньше. Считалось (а некоторыми учеными считается и ныне), что за взрывы ответственна нагретая пластовая или поверхностная вода. Возможность такого нагрева не аргументировалось; процесс представлялся очевидным [Тазиев, 1979]. Такие взрывы стали называть

взрывами бандайсанского типа, или фреатическими.

Однако отсутствует обоснование сколько-нибудь правдоподобного механизма проникновения холодных вод в вулканический канал, как и механизма высокого нагрева (до перемены фазы) холодной воды в условиях верхней части коры.

Действительно. Если холодная вода «зальется» через открытый кратер в канал, как в стакан, то она останется на поверхности кратера, так как канал относительно закупорен, а давление в нем выше, чем наружи. «Проснувшись», вулкан выбрасывает эту воду, как мелочь, и начинает «работать по своим правилам». Так в. Келуд (Ява), взорвавшись 19.05.1919 г, разом выкинул 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 SC_{H_2O} .

Холодные воды вмещающих пород не могут проникнуть в канал потому, что он хорошо герметизирован, а «разрешенное» теплофизикой движение и тепла и горячего вещества идет по температурному градиенту, то есть – от вулкана. Наблюдения показывают, что склоны вулканов часто полностью заснежены, и даже в кратерах лед соседствует с выходами газов, имеющих T до $800-900^\circ C$. То есть теплообмен здесь не наблюдается.

С расплавом успешно смешивается SC_{H_2O} (это его свойство), но не жидкая вода или пар. Для превращения во флюид вода должна нагреться выше $374^\circ C$, находясь под давлением не менее 218 bar, что невозможно без замкнутого пространства. Но, чтобы поверхностная или пластовая вода пришла в соприкосновения с источником нагрева, пространство для её движения должно быть открытым, а режим - проточным. Поток поступающей холодной и отток уже нагретой воды должны быть организованы, как в теплообменнике. «Сооружение» среди пород такой сложной конструкции, как теплообменник, да еще всякий раз - к случаю, от природы требовать не приходится.

Самопроизвольное горизонтальное движение холодной воды в область высоких температур и давлений противоречит правилам теплофизики. Её вертикальное перемещение, обусловленное гравитацией, ограничено наличием открытых полостей и фазовым переходом жидкой воды в газ, после которого пар начнет подниматься.

При различных теоретических построениях и допущениях необходимо учитывать поведение реальных вод в природе. В этой связи – прямые наблюдения не подтверждают свободное и быстрое смешение различных контактирующих вод, как холодных, так и вод разных температур. Оказавшись в контакте, природные воды 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]. Фотографии резких контактов разных вод в местах их соприкосновения (океаны и моря, океанские проливы, слияния рек) можно в изобилии видеть в Интернете, а на перемещение вод Мирового Океана уходит более тысячи лет. Известно удивительное явление пересечения при отсутствии смешения вод двух рек вблизи польского города Вонгровец: Велны и Нельбы. Они пересекаются под прямым углом, при этом каждая бежит в свою сторону и своим «этажом».

Едва ли стоит игнорировать возможность не-высокого (не до смены фаз) и не слишком объемного нагрева воды, как и смешения вод разных температур при каких-то особых условиях. Однако эти простые и случайные механизмы не годятся на роль основополагающих физических процессов, объясняющих взаимоотношение природных вод между собой, а также с расплавами и породами, как и высокую T некоторых природных вод.

Причину и динамику высокой температуры природной воды - нагревается она или остывает? - показывает при выходе её на поверхность поведение в ней газов. В водном флюиде газы очень хорошо растворяются; в горячей воде – не растворяются совсем. Если наблюдаемая природная текучая вода – горячая, динамичная и дегазируется на глазах, то значит, – эта вода остывает из SC состояния. Нагретая из холодного состояния вода уже дегазирована в ходе нагрева и, став горячей, газов не несет.

Таким образом, опора на законы тепломассопереноса, на свойства воды в её разных фазах и на прямые наблюдения природных объектов показывает что:

- ✓ Холодные, окружающие вулканические постройки, воды не проникают в действующий вулканический канал;
- ✓ Холодная вода не может стать флюидом путем её нагрева среди реальных кристаллических пород коры;
- ✓ Наличие или отсутствие дегазации природной горячей воды на выходе можно использовать как указание на её генезис. Активная дегазация - показатель остывающего флюида, нагретая вода газов не содержит.

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 (выплёскивающиеся кратерные озера, тающие снежники и т.п.). Смешиваются они уже на поверхности после извержений.

Заключение

Анализ свойств SCF и наблюдения хода извержений позволяют говорить о большой роли и высокой геологической значимости поступающей с силикатными расплавами глубинной воды, что обеспечивается различными свойствами её фазовых состояний и их переходами.

Наряду с расплавом силикатов, вода – составная часть магмы. О самой магме можно говорить как об их условной «смеси», но только в отношении магм верхней части вулканического канала до глубин не более 5–10 км. По всей глубине канала магма не может быть «смесью» расплава и воды: структура материи в корнях вулкана и у поверхности с неизбежностью должна кардинально отличаться, из чего следует последовательное её изменение по всей высоте канала и, следовательно, последовательное изменение формы сосуществования воды и силикатов.

Общее представление о вулкане как о геологической структуре еще более усложнилось, но едва ли стоит спешить с обобщающей геологической гипотезой. Согласно законам эволюции и самоорганизации сложных систем [Хакен, 1991; Князева, Курдюмов, 1994 и многие др.], геологические структуры и процессы, будучи одними из самых сложных, реализуются чрезвычайно избирательно. Считается, что строятся они по единому принципу, но принцип варьируются способами. Одним из общих правил их развития является постоянная перестройка вещества на микроуровне за счет собственной внутренней энергии [Пригожин, Стенгерс, 1996]. Магма в канале иллюстрирует это положение и можно только догадываться о её меняющихся и парадоксальных свойствах на пути подъема: чтобы дойти до поверхности, её свойства должны быть разными в разных точках пространства канала, как по вертикали, так и по горизонтали; равновесия не достигаются, так как оно равносильно остановке. Магма «умудряется» построить жесткий канал среди жестких пород и подниматься по нему «собственными силами». Процесс должен обеспечиваться свойствами вулканической постройки как особой физической структуры, но понимание этого еще впереди.

В верхней части вулканического канала магма оказывается в состоянии своей последней трансформации. Здесь она «умирает» как магма, превращаясь в разобщающиеся дифференциаты, из которых закристаллизовавшееся твердое вещество ныне достаточно изучено, а о воде, как о быстро разбегающейся субстанции, известно не слишком много. Мы почти не знаем характеристик дождей во время извержений, состава воднорастворимой части свежих пеплов и т.п. Несложно предположить, что это та же самая вода, которая будучи в иной форме и условиях, «работает» как метаморфизирующий и рудообразующий раствор [Арсанова, 2016] и даёт начало термальным водам [Арсанова, 2014], поэтому так важно её всестороннее изучение.

Список литературы

1. 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.
2. Арсанова Г.И. К геохимии цезия: источник цезия в термальных водах и кислых вулканиках

[Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 4. Вып. 1: Система планета Земля. Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprovrv_e-ast4-1.2013.23.

3. Арсанова Г.И. Происхождение термальных вод вулканических областей. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 44–58.

4. 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-aprovrv_e-ast4-1.2013.23.

5. Белоусов А.Б. Эксплозивные извержения вулканов Курило-Камчатского региона: механизм, динамика, закономерности образования отложений. Автореф. дисс. д. г.-м. н. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2006. 42 с.

6. 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.

7. Горбатый Ю.Е. Бондаренко Г.В. Сверхкритическое состояние воды. // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2007. Т. 2. № 2. С. 5–19.

8. Гордеев Е.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П., Кривовичев С.В., Филатов С.К., Антонов А.В., Овсянников А.А. Алмазы в лавах трещинного Толбачинского извержения на Камчатке. // ДАН, 2014, том 454, № 2, с. 1–3.

9. Горшков Г.С. О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106. № 4. С. 703–705.

10. Григорьев Н.А. Распределение цезия и цезиевых макси-минералов в верхней части континентальной коры // Литосфера. 2008. № 6. С. 87–93.

11. Действующие вулканы Камчатки 1991, т. 1. 304 с.

12. Жузе Т.П. Роль сжатых газов как растворителей. М. Недра, 1981. 165 с.

13. Залепугин Д.Ю., Тилькунова Н.А., Чернышова И.В., Поляков В.С. Развитие технологий, основанных на использовании сверхкритических флюидов. // Сверхкритические флюиды: теория и практика. Т. 1. № 1. 2006. С. 27–51.

14. Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П., Ракин В.И., Васильев Е.А., Филатов С.К., Петровский В.А., Флеров Г.Б. Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология, 2014, № 6, с. 3–20.

15. Киржниц Д.А. Экстремальные состояния вещества. // Успехи физических наук. Том 104, вып. 3. Июль. 1971, С. 489–508.

16. Князева Е.Н. Курдюмов С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М. Наука. 1994. 236 с.

17. Кочетков А.В., Федотов П.В. Фазовая диаграмма воды // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4. 2016. <http://naukovedenie.ru/PDF/38TVN416.pdf>

18. Леменовский Д.А., Баграташвили В.Н. Сверхкритические среды. Новые химические реакции и технологии // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 36—41.
19. Леменовский Д.А., Брусова Г.П., Тимофеев В.В., Юрин С.А., Баграташвили В.Н., Попов В.К. Вторая молодость известного явления. // Природа №6, 2006. 42-48 с.
20. Мальшев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург, 2000. Изд-во УрО РАН. 262 с.
21. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. 2014. "Ленанд", 360 с.
22. Озеров А.Ю. Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. Петропавловск-Камчатский – Москва. ГЕОС. 2019. 305с.
23. Попов В.С., Кременецкий А.А. Сверхглубокое научное бурение. // Соросовский образовательный журнал. 1999. №11. С.61-68.
24. Пригожин И.Р., Стенгерс И. Порядок из Хаоса: Новый диалог человека с Природой. 1986. М.: Прогресс. 432 с.
25. Слезин Ю.Б. Механизм вулканических извержений (стационарная модель). М.: Научный мир, 1998. 124 с.
26. Соболева Е.Б. Термогидродинамика сверхкритических флюидов при наличии температурных неоднородностей // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2013. № 4. С. 62—77.
27. Стёпин В.С. Саморазвивающиеся системы и философия синергетики. // Экономические стратегии. 2009 №07. С 24-35.
28. Сулов В.А. Тепломассообмен. СПб, 2008. 120с.
29. Тагиев Г.О. О механизме фреатических извержений Сб. Проблемы глубинного магматизма. М. Наука. 1979. С.70-75.
30. Титаева Н.А., Ермаков В. А., Зазуля Т.А., Ставров О.Д., Чеховских М.М. Геохимические типы базальтов Большого Трещинного Толбачинского извержения 1975—1976 гг. // Петрологические исследования базитов островных дуг. М.: Наука, 1978. С. 69—109.
31. Федотов С.А. Отв. ред. Большое Трещинное Толбачинское извержение (БТТИ). М. Наука. 1984. 638 с.
32. 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. 2009. С.24-27.
33. Филенко Д.Г., Дадашев М.Н., Винокуров В.А., Григорьев Е.Б. Сверхкритическая флюидная технология в нефтепереработке и нефтехимии. // Вести газовой науки. Вып.2(7). 2011. С.82-92.
34. Фортов В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества. // УФН. 2007. Том 177, № 4 С.347-368.
35. Фортов В.Е. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. //УФН. 2009.179:6. С. 653–687.
36. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. 2001 "Наука". 105с.
37. Хакен Г. Синергетика. 1991. М. Мир. 419с.
38. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 279с.
39. Christoph J. Sahle, Christian Sternemann, Christian Schmidt, Susi Lehtola, Sandro Jahn, Laura Simonelli, Simo Huotari, Mikko Hakala, Tuomas Pykkänen, Alexander Nyrow, Kolja Mende, Metin Tolan, Keijo Hämäläinen, and Max Wilke. (2013) Microscopic structure of water at elevated pressures and temperatures. Proc Natl Acad Sci USA 110:6301–6306.

ASSESSMENT OF CHEMICAL SOIL POLLUTION BY BIOTESTING

Gerasimova L.

Candidate of biological sciences, Docent of the Department of life safety, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

Eremina I.

Candidate of biological sciences, Docent of the Department of Breeding, Genetics, Biology and Aquatic Bioresources, Krasnoyarsk state agricultural university

Kuklina A.

Senior lecturer of the Department of Foreign Languages for Technical Specialties, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

Abstract

Technogenic soil pollution with various chemicals negatively affects the environment. The paper describes methods for assessing chemical soil pollution of the territory after the disbandment of a military unit located on it. The phytotoxicity of the territory was assessed using biotesting methods. Conclusions about industrial pollution of soils are drawn. They are based on the analysis of the test object reaction. Watercress was chosen as a test object.

Keywords: technogenic pollution, reclamation, titrimetric method, complexometric titration, germination.

The life of mankind has always been inextricably connected with the natural environment, namely, water, air and soil. Only this triad can provide plants with necessary conditions for existence, and plants can give

people food, animal feed, and raw materials for industry. This greatest natural wealth has been created for centuries and millennia, and one should use it wisely.

In modern life, there are various kinds of environmental impacts that do not always affect the organisms