

## **Раздел 4: ГЕОХИМИЯ И ДИНАМИКА ГАЗОВ И ПРИРОДНЫХ ВОД**

### **РОЛЬ ГАЗОВ В ФОРМИРОВАНИИ РУДООБРАЗУЮЩИХ ГИДРОТЕРМАЛЬНО – МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

**Рычагов С.Н.<sup>1</sup>, Белоусов В.И.<sup>1</sup>, Кузьмин Ю.Д.<sup>2</sup>, Белоусова С.П.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
E-mail: [rychsn@kcs.iks.ru](mailto:rychsn@kcs.iks.ru)*

<sup>2</sup>*Камчатская ОМСП ГС РАН, Петропавловск-Камчатский, E-mail: [kuzy@mail.ru](mailto:kuzy@mail.ru)*

Показана роль газа (магматического, вулканического, гидротермального) как важнейшего элемента формирования гидротермально-магматических конвективных систем районов современного вулканизма, прежде всего – островных дуг. Газ, вероятно, служит основной движущей силой для магматического расплава и является связующим звеном между структурными элементами гидротермально-магматической конвективной системы: расплавом – вмещающими породами – проницаемыми зонами – гидротермальным флюидом – метасоматитами. На основе анализа материалов натуральных и лабораторных исследований в области вулканологии, металлургии и физики горения газов предлагается обсудить концептуальную модель динамики газов в рудообразующих гидротермально-магматических конвективных системах и в геотермальных месторождениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 03-05-64044а, 05-05-79101к и 05-05-74029г).

### **ROLE OF GASES IN CREATION OF HYDROTHERMAL- MAGMATIC SYSTEMS AND GEOTHERMAL DEPOSITS**

**Rychagov S.N.<sup>1</sup>, Belousov V.I.<sup>1</sup>, Kuzmin Yu.D.<sup>2</sup> and Belousova S.P.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky,  
E-mail: [rychsn@kcs.iks.ru](mailto:rychsn@kcs.iks.ru)*

<sup>2</sup>*Kamchatsk OMSP GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, E-mail: [kuzy@mail.ru](mailto:kuzy@mail.ru)*

The role of gas (magmatic, volcanic and hydrothermal) as major elements of formation of hydrothermal-magmatic convective systems in the regions of modern volcanism (insular arc) is shown. The gas, probably, is main motive force for magmatic melt and it is a link between structural elements of the system: magmatic melt – rocks – faults – hydrothermal fluid – metasomatites. On the basis of the analysis of materials of natural and laboratory researches in volcanology, metallurgy and physics of burning of gases we propose to discuss conceptual model of gases dynamics in modern hydrothermal-magmatic convective systems.

The work is performed with financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects 03-05-64044a, 05-05 79101k and 05-05-74029g).

## 1. Введение

В последние годы изучение молодых и палео- гидротермальных систем в областях современного вулканизма, прежде всего, в пределах островных дуг, и разработка концептуальных моделей эпitherмальных рудных месторождений позволили сделать вывод о наличии в этих районах гидротермально-магматических (магмо-вулкано-гидротермальных, по В. Гиггенбаху [24]) конвективных систем (см. статьи С.Н. Рычагова, В.И. Белоусова и др. в настоящем сборнике). Главной особенностью этих систем (ГМС) является перенос тепловой энергии, расплавов, газов и различных химических соединений от уровня верхней мантии в верхние горизонты земной коры.

Как следует из названия, системы состоят из двух частей. Верхняя представлена гидротермальной конвективной ячейкой, в которой главным рабочим телом являются гидротермы в жидком и парообразном состоянии, нижняя - магматической конвективной ячейкой, где основную работу выполняет магматический расплав. Расплав отличается от гидротерм сложным многокомпонентным составом, основу которого составляет силикатная масса. Гидротермальная конвективная ячейка доступна для исследователей, т. к. она расположена вблизи поверхности Земли, часто наблюдается в виде термопроявлений и вскрыта многими скважинами на геотермальных месторождениях. Парогидротермы обладают более низкими, чем у магмы, P-T параметрами, что и предопределяет большую доступность их для непосредственного изучения в полевых условиях. Магматическая конвективная ячейка проявляется на земной поверхности эпизодически в виде извержений вулканов. Последние носят, в основном, катастрофический характер и доступны лишь визуальным наблюдениям с больших расстояний. Чаще всего истечение магмы и её взаимодействие с гидросферой, в результате чего и формируется гидротермальная конвективная ячейка, происходит глубоко в недрах земной коры или в океанических глубинах. Поэтому вулканы и гидротермальные системы, доступные для наблюдения, несут уникальную информацию о глубоких горизонтах земной коры и даже о мантии и должны быть тщательно изучены.

Важную работу в этом направлении проводят исследователи из Геологической Службы Японии, которые в натуральных и лабораторных условиях изучают процесс отделения магматических газов из расплава [29-31]. При полевых исследованиях на действующих вулканах и современных гидротермальных системах

Камчатки и Курильских островов в 1960-90-ые годы в Институте вулканологии ДВО РАН накоплена большая информация, анализ которой в совокупности с обсуждением материалов экспериментальных исследований в области вулканологии, металлургии и физики горения газов, позволяет авторам принять участие в разработке концептуальной модели динамики газов в ГМС островных дуг.

## **2. Теплопередача и массоперенос в магматической конвективной ячейке и в зоне ее контакта с гидротермальной ячейкой**

В природе известны три способа теплопередачи: кондуктивный (молекулярный), конвективный (тепломассоперенос) и лучистый. Конвективная теплопередача различается двух видов: свободная (естественная) и вынужденная конвекция. Исследователи тепломассопереноса считают, что свободная конвекция («всплывание» легких горячих масс и погружение тяжелых холодных), которая реализуется в магматических каналах и очагах, является главенствующей [21, 30]. Ведущим механизмом в этом способе теплопередачи является «архимедова сила», которая определяется разницей плотностей взаимодействующих фаз. Х. Шиохара и К. Казахайя в своих расчётах исходят из механизма дегазации восходящего потока магматического расплава. Они показали, что дегазированная магма имеет повышенную плотность и образует нисходящий поток, который погружается по магмоводу в глубокие недра магматической конвективной ячейки [29]. В восходящем потоке магма дегазирует в зоне пониженных давлений и в момент её закристисталлизации. В работе приводятся расчёты, которые базируются на законах пуазейлевого потока и всплывания сферических тел, регулируемого законом Стокса. Эти модели рассматриваются в приложении к информации, полученной при наблюдении извержений вулкана Изу-Ошима в Японии в конце 1980-х годов [26]. Во время извержения наблюдалась избыточная дегазация по отношению к насыщению магматических расплавов. Предполагается, что перенасыщение летучими распространяется вглубь магматической колонны вплоть до корового магматического очага, верхняя кромка которого расположена на глубине 4 км от кратера вулкана. Эти исследования на вулкане Изу-Ошима подтверждают большую роль газов в магматических расплавах, которые, в свою очередь, являются важным элементом в динамическом механизме конвективного тепломассопереноса в ГМС.

Мы считаем, что предлагаемые модели, базирующиеся на свободной конвекции, должны быть дополнены другими механизмами тепломассопереноса,

поскольку в этих моделях не учитывается состав газов. Как магма, так и газы представлены лишь в качестве рабочих тел, которые нейтральны друг к другу и не претерпевают тепловых и химических изменений на путях миграции. Газы, химически инертные, выделяются из магмы как пар из воды во время ее кипения. Однако, в действительности, магма является сложным многокомпонентным теплоносителем, в котором происходят химические реакции (экзотермические и эндотермические). Их скорость характеризуется величинами, свойственными процессам горения, от медленных до мгновенных. Горение - это особой интенсивности окислительно-восстановительные («Редокс») процессы, в результате которых поддерживаются высокие температуры нагретости магмы. Они, в свою очередь, влияют на поддержание процессов горения (самовозгорание) и мы полагаем, что магматический расплав, восходящий с уровней верхней мантии к поверхности земли и формирующий в верхней коре гидротермальную конвективную ячейку, необходимо рассматривать в качестве теплового химического реактора, функционирование которого обеспечивается химической кинетикой.

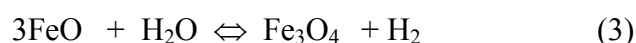
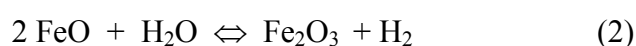
### **2.1. «Редокс» процессы, происходящие в магматических расплавах**

Редко создаются условия, позволяющие рассчитать количество газа, высвобождающегося во время вулканического извержения. Газ образует огромное облако, он не только сильно расширяется, но и смешивается с большим количеством воздуха. При извержениях, когда лава свободно изливается на поверхность, весовое количество газа по отношению к лаве, как правило, составляет доли процента. В последние годы дистанционными приборами удается производить оценку количества и состава газов, выделяющихся из кратеров вулканов, не изливающих лаву. В составе газов фиксируются пары воды, углекислый газ, водород, окись углерода, сернистый газ, хлористый водород, фтористый водород, метан и другие. Во всех анализах газов преобладает вода. Швейцарский геохимик А. Брюн возражал против этого положения, считая, что вулканические газы безводны. А. Брюн предполагал, что газ из кратеров вулканов не конденсируется, когда он проникает сквозь холодные породы на своём пути к жерлу. Его аргумент в пользу этого предположения был отвергнут, как противоречивший общепринятому факту. То обстоятельство, что вода представляет собой существенную часть вулканических газов, не вызывает сомнений, однако остаётся неизвестным - какое её количество поступает из пород, а какое является результатом реакции водорода, поступившего

из глубины, с кислородом воздуха: при извержениях некоторых вулканов доля водорода в газах составляет до 30% или выше [10].

В связи со сказанным, представляются важными наблюдения, сделанные нами в кратере вулкана Остров Уайт (Новая Зеландия) и вулканах Горелый и Мутновский на Камчатке. Особенно информативными являются ночные наблюдения раскалённых участков кратеров, которые удалось выполнить Ю.Д. Кузьмину: горение является характерной особенностью термопроявлений в кратерах этих вулканов и спектры пламени соответствуют водороду. Большую ценность представляют наблюдения за процессами, происходившими во время Большого Трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) на Камчатке в 1975-76 гг.: взрывная деятельность в районе Северного прорыва характеризовалась процессами детонации, сопровождавшимися горением газов [17].

Температура лав и газов является информативной характеристикой при расшифровке процессов, происходящих в магме. К примеру, известно, что присутствие летучих в магматической камере должно понижать температуру кристаллизации расплава. Температуры лавы, измеренные оптическими пирометрами во время извержения вулкана Килауэа, были на 25-120<sup>0</sup>С ниже температур, рассчитанных теоретически [10]. Отмечается следующая особенность распределения температур в лаве. Температура у поверхности лавового озера на вулкане Килауэа была на 140<sup>0</sup>С выше, чем на глубине 1 м. Это объясняется нагреванием расплава за счёт горения газов. В местах выделения газов, где они воспламенялись над поверхностью лавового озера, температура достигала 1350<sup>0</sup>С, а расчётная температура у дна озера была 1170<sup>0</sup>С и соответствовала температуре магмы, восходящей по каналу. При изучении неоднородностей температурных полей поверхности шлаковых конусов Северного прорыва после окончания БТТИ было выяснено, что разогрев в шлаковых конусах обусловлен окислительно-восстановительными процессами [19]:



Ю.П. Трухин и Р.А. Шувалов высказали предположение о роли этих реакций во взаимодействии магматического расплава с кислородом воздуха в зоне аэрации и с метеорными и ювенильными водами [19]. Они считают, что наибольший тепловой

эффект дает реакция с участием ювенильной воды; реакции 2 и 3 сопровождаются существенным экзотермическим эффектом, который поддерживает высокотемпературный режим в магматической колонне. Из магмы продолжают выделяться летучие, генерируемые в уже «остановившемся» расплаве.

## **2.2. Основные особенности процессов горения в природных условиях**

Считается, что основная особенность горения заключается в том, что условия, необходимые для быстрого протекания реакции, созданы ею самой [22]. Эти условия создаются либо за счет большой температуры, либо - высокой концентрации активных продуктов - катализаторов (переносчиками реакционных цепей являются свободные атомы, радикалы, органические примеси, др.). Если сама реакция создает условия для быстрого протекания, то возникает обратная связь. При незначительном изменении внешних условий возможен переход от стационарного режима с малой скоростью реакции к режиму, когда ее скорость нарастает по экспоненциальному закону. Горением называется протекание химической реакции в условиях прогрессивного самоускорения, связанного с накоплением в системе тепла или катализирующих продуктов реакции [22]. В первом случае говорится о тепловом, во втором - о цепном или автокаталитическом горении.

Две другие особенности явлений горения заключаются в: 1) наличии критических условий, 2) способности процесса к распространению. При тепловом горении распространение пламени происходит посредством передачи тепла, при цепном (диффузионном) - посредством передачи активных веществ, т.е. диффузии. При тепловом горении также имеют место диффузионные процессы и тепловая теория должна их учитывать. Но, в отличие от цепного горения, повышение температуры при тепловом горении является основной причиной ускорения реакции. В технике основное значение имеют процессы теплового горения, хотя кинетика реакций в большинстве случаев цепная.

Во всех процессах горения, независимо от химической природы, основную роль играют критические явления и особенности распространения зоны реакции. Эти явления характеризуются резким изменением режима горения при малых вариациях внешних условий. Наиболее резко проявляется влияние температуры. Известно, что скорости всех элементарных химических процессов являются функциями температуры: их температурная зависимость выражается законом Аррениуса. Критические явления происходят от нарушения условий равновесия между реагирующей системой и окружающей средой. К критическим явлениям

относятся воспламенение, зажигание и концентрационные пределы распространения пламени. Воспламенение вызывается повышением начальной температуры, которая достигается подводом тепла или быстрым сжатием. Самопроизвольное воспламенение осуществляется в определенных условиях давления и температуры (рис. 1). Графическое изображение наблюдающихся здесь соотношений называют

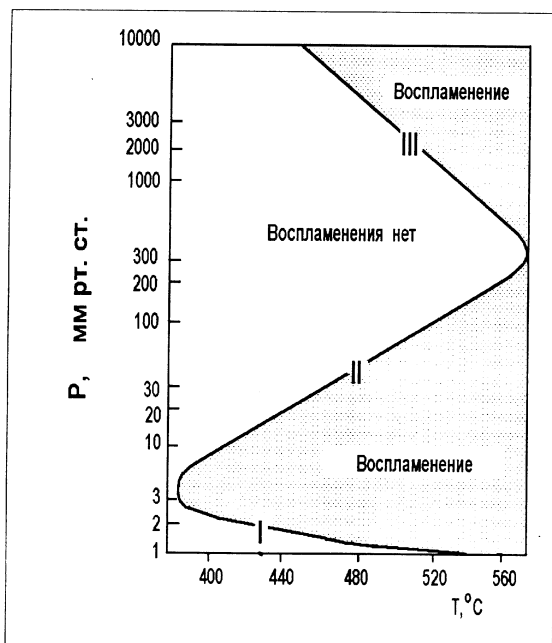


Рис. 1. «Полуостров воспламенения» при реакции окисления водорода, по [6]. I – III - Пределы воспламенения.

полуостровом воспламенения. На рис. 2 приведена картина окисления водорода. Сходное явление наблюдается при окислении паров фосфора, окиси углерода и др.

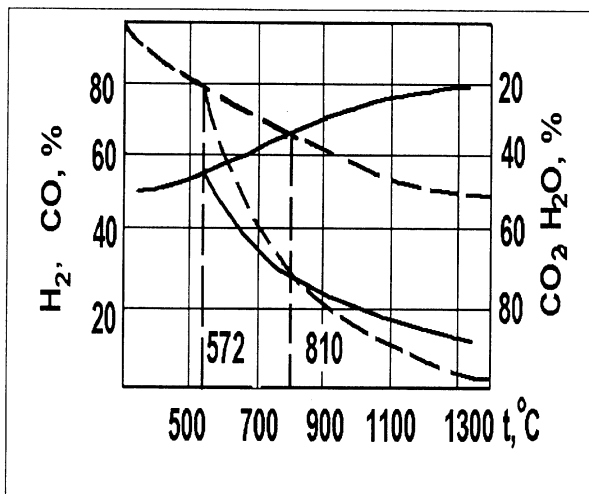


Рис. 2. Равновесный состав газовых фаз в системах Fe-O-C и Fe-O-H, по [2].

Воспламенение смеси водорода или окиси углерода с кислородом происходит в присутствии паров воды, даже в незначительном количестве ( $10^{-4}$  и  $10^{-5}$  мм рт.ст.). Характерно, что в области самовоспламенения быстрая реакция начинается по истечении некоторого времени, называемого периодом индукции, продолжительность которого для реакции окисления водорода составляет доли секунды. Зажиганием, или вынужденным воспламенением, обычно называется

возникновение горения под действием местного импульса: электрической искры или накаливаемой поверхности.

К явлениям распространения горения относятся: нормальное распространение пламени горения в неравномерно движущемся газе, турбулентное горение и детонация. Нормальное горение - это распространение пламени в отсутствии газодинамических эффектов, связанных с градиентами давления, или с турбулентностью. Скорость распространения этого идеализированного процесса называется нормальной скоростью пламени. Она зависит от кинетики реакции и коэффициентов теплопроводности диффузии. Нормальная скорость пламени определяется кинетикой реакции во фронте пламени, при максимальной температуре горения. В обычных условиях процесс горения сопряжен с движением газа. Если такое движение и не создается искусственно, как в доменном процессе, то оно возникает само вследствие термического расширения и увеличения объема продуктов реакции горения. При сверхзвуковых движениях газов, которые могут возникать во время взрывных извержений расплава, в нем возникают ударные волны (скачки уплотнения), т.е. поверхности, где резкое сжатие происходит на расстоянии порядка длины свободного пробега. Работа сжатия преобразуется в тепловую энергию, происходящий при этом разогрев может привести к воспламенению. Распространение горения посредством воспламенения ударной волной носит название детонации. Как отмечалось ранее, такие процессы наблюдались на БТТИ [17].

Различают гомогенное, гетерогенное и диффузионное горение. Гетерогенное горение происходит на поверхности раздела фаз. Одно из реагирующих веществ находится в конденсированной фазе (твёрдой или жидкой), другое (обычно кислород) доставляется диффузией из газовой фазы. Для того, чтобы горение было гетерогенным, конденсированная фаза должна иметь высокую температуру кипения, так, чтобы при температуре ее горения испарением можно было пренебречь. Примером истинного гетерогенного горения является горение нелетучих металлов. При этом горении образуются тугоплавкие окислы. Как нам представляется, гетерогенное горение характерно для окислительно-восстановительных процессов, происходящих в доменной печи и в магматических колоннах.

Температурный режим функционирования сложнейших окислительно-восстановительных процессов, идущих со скоростью горения в доменной печи, поддерживается в интервале температур, свойственной температуре базальтового



магматического расплава 1100-1300<sup>0</sup>С. Такой высокотемпературный режим поддерживается за счет самопроизвольного горения окиси углерода и водорода, выделяющего большое количество тепловой энергии (теплотворная способность H<sub>2</sub> = 28905 ккал/кг), а также реакции восстановления окислов железа и образования сложных силикатов и алюмосиликатных расплавов [2]. Газ, состоящий из H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, является конечным продуктом окислительно-восстановительных реакций, характерных для процессов горения.

### **3. Роль газов в транспортировке рудных соединений и отложении металлов в структуре гидротермально-магматических систем**

Известно, что при извержении вулканов на дневную поверхность и в атмосферу выносятся большое количество рудных, щелочных и других элементов: Mg, Mn, Na, K, Ca, Al, Fe, As, Zn, Sr, Ba, Cu, Pb, Sn, Sb, Ge, Ag, Cr, Ni, Mo и др. [22, 24]. При извержении вулкана Килауэа в 1970 году главными компонентами газов были Na, Ca, Al, Fe, Mg, K, Ti, Zn, Cu и Ni [28]. Установлено также содержание В и Si в существенных количествах. Присутствие в вулканическом газе тяжелых металлов связывается с их селективным испарением из магмы и последующей конденсацией при охлаждении [27]. Позже было установлено, что содержание металлов и кремния в вулканических газах фактически значительно выше, чем то, которое может быть обусловлено их летучестью [18, 20]. Анализируя состояние дел в вопросе изучения механизмов транспортировки и отложения металлов в газогидротермальной среде, необходимо отметить, что решение проблемы находится на начальном этапе накопления фактического материала и создания концептуальных моделей.

Полученные нами данные на примере ряда современных высокотемпературных ГМС Камчатки и Курильских островов практически являются результатами натуральных экспериментальных исследований.

Из керна и шлама скважин, пробуренных в центральных частях высокотемпературных ГМС Баранского (о.Итуруп, Южные Курильские острова), Мутновской (Южная Камчатка) и Северо-Парамуширской (о.Парамушир) выделены информативные, с точки зрения характеристики P-T условий среды минерало-рудообразования, и считавшиеся ранее экзотическими, минеральные объекты - рудные и силикатные глобулы [16]. Исследование распределения рудных и силикатных глобул в пределах геологической структуры современной

высокотемпературной ГМС показало, что эти минеральные образования характерны для зон восходящего потока гидротермального (гидротермально-магматического ?) флюида - горстов, их краевых и особенно осевых частей. Осевые части горстов представляют собой трещинно-брекчиевые зоны мощностью до нескольких сотен метров, открытые на глубину не менее 1,5 – 2,0 км [14]. По этим зонам происходит подъем наиболее горячих газонасыщенных гидротермальных растворов. Температуры растворов по результатам прямых замеров в скважинах составляют до 320<sup>0</sup>С, а по данным изучения газово-жидких включений в минералах и минеральным геотермометрам - до 470<sup>0</sup>С [15]. Метасоматиты различного состава на всем протяжении вертикального разреза содержат большое количество шариков, которые чаще всего находятся внутри пустот, пор и трещин, реже – облекаются гидротермальным цементом, равновесным с раствором. Вместе с тем, глобулы полностью отсутствуют в породах зон питания гидротермальной системы – в опущенных блоках или на периферии системы, где происходит охлаждение пород метеорными, морскими и отработанными термальными водами. В Северо-Парамуширской ГМС из пород глубокого разреза (скважина глубиной 2500 м) выделены единичные глобулы, но интервал 850-1000 м обогащен ими. Этот интервал приходится на границу между толщами пород, отличается их повышенной пористостью и трещиноватостью и, вероятно, является верхней границей крупного парового резервуара.

По-видимому, глобулы самородного железа, иоцита, шорломита, магнетита и их зональные разности формируются при температуре не менее 500-600<sup>0</sup>С на глубинах более 1-1,5 км в непосредственной близости (в брекчиевой мантии) или в пределах интрузивного тела (периферического магматического очага?) и транспортируются к дневной поверхности в составе «сухого» газового флюида. В пользу наличия восстановленного флюида в близповерхностных условиях свидетельствует также факт выделения большого количества водорода из термальных источников в пределах горста «Кипящая Речка» [7] и других горстов, контролирующих восходящий тепловой поток в пределах ГМС Баранского. Таким образом, силикатные и рудные глобулы, установленные в пределах структуры ГМС, находящейся на высокотемпературном (прогрессивном) этапе развития, служат индикаторами больших температур газово-жидкого флюида, высокой степени его восстановленности («сухости») и проницаемости зон. В остывающих гидротермальных системах не обнаружены глобулы, как нет и признаков наличия

восстановленного флюида. Кроме того, исследования глобулей показали, что гидротермальный флюид обладает высокой газонасыщенностью и активно формирует саму геологическую структуру системы. Об этом говорит широкое развитие гидротермальных брекчий в зонах современных тектонических нарушений, полимиктовых комбинированных брекчий с сульфидной минерализацией в контактовых частях интрузивных тел, повсеместное присутствие микробрекчиевых текстур в интенсивно гидротермально измененных породах и гидротермалитах.

Формирование и перенос рудного и силикатного вещества происходит, по всей видимости, при значительном участии элементоорганических соединений: это подтверждает постоянно присутствующая ассоциация самородного углерода (графита) с минералами, слагающими глобули. Отложение глобулей могло происходить в случае распада этих соединений при понижении давления или повышении потенциала кислорода, но судя по фактическим данным - чаще всего на значительных глубинах: 1 км или более от дневной поверхности. По-видимому, большая роль в транспортировке металлов и их соединений принадлежит хлору, который проявляет высокую миграционную способность и легко отделяется от расплавов во флюидную фазу. Отмечается исключительно высокая эффективность хлоридной экстракции металлов из алюмосиликатных расплавов [8]. Многие металлы (Au, Ag, Fe, W и др.) характеризуются высоким химическим сродством к хлору и образуют с ним хлоридные комплексы. Кроме того, Cl часто входит в состав элементоорганических соединений [18].

Изучение ГМС, находящихся на прогрессивном, экстремальном и регрессивном этапах развития, показало, что за относительно короткий геологический отрезок времени (десятки тысяч лет) в структуре системы происходит интенсивное перераспределение рудного вещества: от привноса и рассеяния в большой массе метасоматитов до концентрирования на геохимических барьерах, их укрупнения и создания рудных тел. Механизм такого перераспределения трудно понять, не привлекая к объяснению активное участие в данном процессе летучих компонентов – магматических газов и газовой-жидкой рудоносной гидротермальной флюиды.

#### **4. Обсуждение результатов: предполагаемые процессы в конвективной магматической ячейке**

Процессы, происходящие в магматической ячейке ГМС по многим

параметрам сходны с пирометаллургическими: магматический расплав в близповерхностных условиях также выделяет  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  и кроме того -  $SO_2$ , присутствуют  $N_2$ ,  $HCl$ ,  $HF$ . Все это - конечные продукты горения, которые отмечаются при извержении базальтовых вулканов. Рассматривая физико-химические и химико-кинетические процессы в пирометаллургии, можно объяснить некоторые явления, отмечаемые исследователями магматизма. Например, явления свечения базальтовых расплавов на вулкане Изу-Ошима и других вулканах можно интерпретировать как реакции горения газов на поверхности магматического расплава, которое обеспечивает дополнительный разогрев магмы. Температура газов достигает  $1300-1400^{\circ}C$ , а по некоторым данным -  $1700^{\circ}C$ . Горение водорода и окиси углерода осуществляется при взаимодействии с кислородом воздуха, в результате чего образуется водяной пар. Мы считаем, что швейцарский геохимик А.Брюн, в основном, верно полагал, что в магматическом расплаве нет растворённой воды. Необходимо уточнить, что в базальтовом расплаве, температура которого более  $1000^{\circ}C$ , молекула воды образуется в остывающей магме. Особенно интенсивно этот процесс происходит при выбросе ее, разбрызгивании и бурном истечении, когда поток магмы характеризуется высокой степенью турбулентности. Это сопровождается активным взаимодействием магматических газов с кислородом воздуха. Если вода выделяется из магматического расплава в виде высокотемпературного пара ( $\sim 1000^{\circ}C$ ), энтальпия которого составляет  $\sim 1000$  ккал/кг, то дегазация расплава вызывает резкое снижение температуры магмы в магмоводе и на поверхности, как это происходит в пароводяных скважинах [1]. Теплотери могут быть компенсированы дополнительным теплом, как поступающим в виде новых порций магматического расплава, так и образующимся за счет протекания цепных окислительно-восстановительных реакций [23].

Расчёт скорости обычной диффузии для водяного пара не может обеспечить реально измеренные потоки летучих, выделяемых магматическими расплавами [29]. Экспериментами доказано, что скорость диффузии водорода в силикатном расплаве превышает скорость диффузии молекул воды в 1000 раз [12]. Эти данные подтверждаются и на примере доменных процессов: время преодоления высоты домны от фурм до колосников восходящими потоками летучих составляет несколько секунд. Здесь необходимо учитывать, что верхняя часть шихты имеет рыхлую текстуру. При температурах более  $500^{\circ}C$  хотя и происходит спекание шихты, но преодоление летучими этого участка происходит довольно быстро. Возможно,

выделение свободной газовой фазы в магматической колонне и турбулентное течение в её верхней части создают высокопористую среду. Даже в случае ламинарного течения газы могут мигрировать по ослабленным границам струй, на что указывает “пузырчатость” полосчатых риолитов и дацитов некоторых экстрезий. В более текучем базальтовом расплаве такая фильтрация газов предположительно имеет большие скорости. Диффузия газовых молекул в сторону этих границ и последующее перемещение газов со слоями расплавов должно способствовать их перемешиванию с образованием свободных фаз горючих газовых смесей и воспламенению от трения слоев расплава в ламинарном потоке или от высокой температуры силикатного расплава. В результате горения газовых смесей увеличивается объем продуктов сгорания и выделившееся тепло разогревает эти участки расплава, понижая его вязкость. Одновременно понижается растворимость газов в приграничных слоях. Эта цепочка событий не может описываться термодинамическими уравнениями. Их можно применять лишь к квазистационарным процессам. Основываясь на обсуждениях описанной выше информации, авторы приходят к выводу, что магматический расплав не является инертным телом. На путях миграции от верхней мантии до поверхности Земли в самом магматическом расплаве происходят кинетические реакции с выделением и поглощением тепла с различными скоростями, давлениями и температурами. Весь комплекс процессов, происходящих в саморегулирующемся магматическом расплаве, обеспечивает автоматическое поддержание теплового режима, который определяет функционирование ГМС. «Главной задачей» системы является передача тепловой энергии от магматического очага в земную кору и атмосферу.

Таким образом, магматическая конвективная ячейка представляет собой систему потокового типа, в которой господствующим способом теплопереноса является вынужденная конвекция. Этот способ теплопередачи обеспечивается многими кооперативно действующими процессами. Существенная черта такого кооперативного поведения в магматическом процессе - эффект самоорганизации, т.е. возникновение, развитие и гибель макроскопических структур в неравновесных условиях. Исследования по теории самоорганизации таких физико-химических систем, как магматическая конвективная ячейка, далеки от окончательного решения и находятся на стадии получения информации и первых обобщений [13]. Эти авторы считают, что эффекты самоорганизации наблюдаются в открытых системах потокового типа, связанных, по меньшей мере, с двумя внешними системами, не

находящимися в равновесии друг с другом. Незатухающие потоки энергии и вещества поддерживают систему в состоянии, далеком от теплового равновесия. Рост установившейся упорядоченности в таких системах происходит с повышением степени неравновесности при увеличении потока энергии и (или) вещества. В случае с магматической конвективной ячейкой этот эффект фиксируется стадией прорыва магматической колонны через литосферу к поверхности Земли и квазистационарным истечением дифференцирующегося магматического расплава во время извержения. Явления самоорганизации в неравновесных системах принципиально отличаются от явлений упорядочения в равновесных системах, где порядок системы возрастает при понижении температуры.

Несмотря на различную природу этих явлений, существует аналогия в описании равновесных фазовых переходов и эффектов самоорганизации в открытых системах. Равновесные фазовые переходы реализуются в кристаллизующихся магматических очагах, в экструзиях или остывающих лавовых потоках. В связи с этим к ним применимы термодинамические уравнения. Самоорганизация связана с явлениями турбулентности. Оба эффекта наблюдаются в неравновесных системах потокового типа, как правило, при больших интенсивностях потоков следует ожидать именно турбулентное течение. При больших разностях температур (разность температур в мантии и земной коре  $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ; разность температур в мантии и в верхних слоях атмосферы  $\sim 1300^{\circ}\text{C}$ ), магматическая система переходит в состояние с турбулентным режимом конвекции. С другой стороны, если интенсивность внешнего воздействия мала, состояние открытой системы близко к равновесному. Таким образом, при увеличении интенсивности воздействия наблюдается переход от теплового равновесия к турбулентному режиму, как это происходит при инъекции глубинного базальтового расплава в коровые дифференцированные очаги [3-5]. Зарождение турбулентности может происходить скачком, либо занимать некоторый интервал значений параметров, характеризующих определенную степень внешнего воздействия на рассматриваемую систему. В последнем случае переход к турбулентному режиму осуществляется путем последовательного усложнения регулярных структур.

В качестве примера приведем описание прорыва базальтового расплава на вулкане Академии Наук в 1996 г. [21]. Сейсмические события свидетельствовали, что развивающаяся вверх магматическая колонна в земной коре вошла в остывающий коровый магматический очаг, который находился в состоянии

теплового равновесия, установившегося после извержения, произошедшего более 20000 лет назад. В течение ~ 30 часов базальтовый мантийный расплав, нарушив тепловое равновесие в коровом очаге, вызвал образование свободной газовой фазы в охлажденном и насыщенном растворенными равновесными газами магматическом расплаве андезитового состава. Это привело к резкому увеличению объема слабо перемешанного расплава и к фреато-магматическому извержению вулкана Академии Наук: выброшен шлак, пемза, другие виды пирокластики и образовался шлаковый конус на севере Карымского озера. Считается, что образование таких структур представляет собой явление самоорганизации в неравновесных системах.

## 5. Заключение

Таким образом, газ является важнейшим элементом функционирования гидротермально-магматических систем: газовые потоки осуществляют перенос значительной части рудных, щелочных и породообразующих химических элементов и их соединений из магматической конвективной ячейки в гидротермальную; газ, вероятно, служит основной движущей силой для магматического расплава, заставляющей перемещаться его от глубин верхней мантии в близповерхностные горизонты земной коры; газ является основным связующим звеном (рабочим телом) между всеми структурными элементами гидротермально-магматической конвективной системы (магматическим расплавом – вмещающими породами – проницаемыми зонами – гидротермальным флюидом – метасоматитами).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аверьев В.В.** Гидрогеологическое опробование скважин // Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука. 1965. С. 144-167.
2. **Готлиб А.Д.** Доменный процесс. М.: Металлургия. 1966. 503 с.
3. **Гриб Е.Н.** Петрология продуктов извержения 2-3 января 1996 г. в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1998. № 5. С. 71-97.
4. **Гриб Е.Н., Леонов В.Л.** Игнимбриты кальдеры Большой Семячик (Камчатка): состав, строение условия образования // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5-6. С. 34-50.
5. **Гриб Е.Н., Леонов Л.В.** Игнимбриты Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии, Камчатка: сопоставление разрезов, состав, условия образования // Вулканология и сейсмология. 1993. № 5, С. 15-33.
6. **Ерёмин Е.Н.** Основы химической кинетики в газах и растворах. М.: МГУ. 1971. 384 с.
7. **Знаменский В.С., Никитина И.Б.** Гидротермы центральной части острова Итуруп (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 44-65.
8. **Маракушев А.А., Сук Н.И., Новиков М.П.** Хлоридная экстракция рудогенных металлов и проблема их миграции из магматических очагов // Доклады АН. 1997. Т. 352. № 1. С. 83-86.

9. **Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Гусева В.В., Шапарь В.Н.** Результаты отбора и анализа вулканических газов на Толбачинском трещинном извержении в 1975 г. // Докл. АН СССР. 1976. Т.230. № 2. С.440-442.
10. **Макдональд Г.** Вулканы. М.: Мир. 1975. 431 с.
11. **Набоко С.И.** Вулканические эксгаляции и продукты их реакций // Труды Лабор. вулканологии АН СССР. 1959. 304с.
12. **Персигов Э.С., Бухтияров П.Г., Польский С.Ф., Чехмир А.С.** Взаимодействие водорода с магматическими расплавами // Эксперимент в решении актуальных задач геологии. М.: Наука. 1986. С 48-70.
13. **Полак Л.С., Михайлов А.С.** Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах. М.: Наука. 1983. 288 с.
14. **Рычагов С.Н.** Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: модель геологической структуры // Вулканология и сейсмология. 1993. № 2. С. 59-74.
15. **Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Гончаренко О.П., Жатнуев Н.С., Коробов А.Д.** Температурная и минералого-геохимическая характеристика геотермального месторождения Океанское (о-в Итуруп) // Геология рудных месторождений. 1993. Т.35. № 5. С. 405-418.
16. **Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Сандимирова Е.И.** Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры, флюидного режима и минералорудообразования в современной гидротермальной системе Баранского (о-в Итуруп) // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 31-40.
17. **Слэзин Ю.Б., Федотов С.А.** Физические характеристики извержения. // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975-1976. М.: Наука. 1984. С. 143-176.
18. **Слободской Р.М.** Элементоорганические соединения в магматогенных и рудообразующих процессах. Новосибирск: Наука. 1981. 135 с.
19. **Трухин Ю.П., Шувалов Р.А.** Окислительно-восстановительные реакции, процессы газогенерации и вторичный разогрев на шлаковых конусах // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975-1976. М.: Наука. 1984. С. 356-372.
20. **Уайт У.С.** Месторождения самородной меди в северной части штата Мичиган // Рудные месторождения США. М.: Мир. 1972. Т. 1. С. 457-481.
21. **Федотов С.А.** Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С.3-37.
22. **Франк-Каменецкий Д.А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука. 1967. 491 с.
23. **Giggenbach W.F.** Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand // Appl. Geochem.. 1987. V.2. P. 143-161.
24. **Giggenbach W.F., Garcia N.P., Londono A., Rodriguez L.V., Rojas N. G., Calvache M.H.V.** The chemistry of fumarolic vapor and thermal-spring discharge from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia // J. Vol. Geotherm.. Res. 1990. 42. P. 13-39.
25. **Hedenquist J.W., Houghton B.F.** Epithermal gold mineralisation and its volcanic environments // The earth resources Foundation the University of Sydney Taupo. Vol. Zone, N.Z. 1987. 15-21 november.
26. **Kazahaya K., Shinohara H., Saito G.** Excessive degassing of Izu-Oshima volcano: magma convection in a conduit // Bull.Volcanol.. 1994. N 56. P. 207-216.
27. **McClaine L.A., Allen R.V., McConnell R.K., Surprenant N.F.** Volcanic smoke clouds // J. Geophys. Res.. 1968. V.73. N 16. P. 5235-5246.
28. **Naughton J.J., Lewis V.A., Hammond D., Nishimoto D.** The chemistry of sublimates collected directly from lava fountains at Kilauea Volcano, Hawaii // Geochim.Cosmochim.Acta. 1974. V.38. N 11. P. 1679-1690.
29. **Shinohara H., Kazahaya K.** Degassing processes related to magma-chamber crystallization // Mineralogical Association of Canada, Short Course Series: Magmas, Fluids, and Ore Deposits. Victoria, British Columbia. 1995. V. 23. P. 47-70.
30. **Shinohara H., Kazahay K., Lowenstern J.B.** Volatile transport in convecting magma column: implications for porphyry Mo mineralization // Geology. 1995. V. 23. N 12. P. 1091-1094.
31. **Shinohara H., Hedenquist J.W.** Constraints on Magma Degassing beneath the Far Southeast Porphyry Cu-Au Deposit, Philippines // Journal of Petrology. 1997. V. 38. N. 12. P.1741 1752.