

ОТЗЫВ

официального оппонента Плюснина Алексея Максимовича, доктора геолого-минералогических наук, старшего научного сотрудника, заместителя директора по науке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, plyusnin@ginst.ru, р.т. 8(3012)434708, м. 8(983)6310669 на диссертацию Шевко Елизаветы Павловны «Физико-химическая модель формирования активных газогидротерм Камчатки и Курильских островов», представленной на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Диссертационная работа посвящена реконструкции механизмов функционирования и развития газогидротермальных систем активных вулканов Курило-Камчатской островной дуги. В работе обсуждаются оригинальные данные по вулканам Мутновский (п-ов Камчатка), Эбеко (о-в Парамушир, Северные Курилы), Головнина (о-в Кунашир, Южные Курилы).

Работа состоит из введения, шести глав и заключения, список использованной литературы включает 142 наименования.

Актуальность представленной диссертационной работы определяется тем, что химический состав термальных вод является отражением многих превращений, произошедших с флюидом от момента формирования на больших глубинах до поступления на поверхность Земли. Прямые наблюдения и замеры параметров возможны только в приповерхностной части гидротермальных систем. Физико-химическое и термодинамическое моделирование взаимодействий вода-порода позволяет определить закономерности и особенности миграции флюида, протекание химических реакций на пути его движения, установить генезис химических элементов в местах разгрузки гидротерм.

Цель диссертационной работы - создание физико-химических динамических моделей, воспроизводящих механизм функционирования флюидо-гидротермальных систем активных вулканов и реконструкция геохимической истории ключевых элементов от момента отделения из магматической камеры до выхода на поверхность с газогидротермальными потоками.

Задачи исследований:

- Определить состав и физико-химические параметры термальных источников на фумарольных полях исследованных вулканов. Выявить элементы, с помощью которых будет описан состав термодинамической системы;
- Расчет семейства моделей и выбор оптимальных, которые с наиболее высокой степенью приближения отражают геохимические условия на фумарольных полях. С их помощью описать механизмы взаимодействия флюид-порода и обосновать степень протекания реакций во времени и пространстве, приводящих к наблюдаемой минеральной зональности;
- Решить вопрос о путях миграции каждого конкретного элемента в зависимости от его геохимических свойств и физико-химических параметров флюида;

- Выявить зоны накопления или рассеивания элементов в зависимости от температуры, давления, степени протекания реакции, состава флюидов и строения флюидопроводников.

Диссертантом проводились полевые исследования на действующих вулканах Камчатки и Курильских островов. Лабораторные исследования включали изучение состава пород и водных растворов, изучение пористости, проницаемости, электропроводности. Они проводились сертифицированными современными аналитическими методами. При физико-химическом моделировании использовались методы предложенные Карповым И.К. (1980), Чудненко К.В. (2010), Гричуком Д.В. (2012), Борисовым (2010), а также разработки автора.

В работе систематизирован материал по нескольким вулканам Камчатки и Курильских островов, полученный за последние пятнадцать лет, в том числе и по динамике изменения флюидного режима. Приведен богатый фактический материал по геологическому строению вулканов. Разработана концептуальная модель расчета движения флюида от магматической камеры к местам разгрузки, которая предполагает первоначальный расчет теплофизических и гидродинамических параметров, а затем физико-химических равновесий. Автором создан программный комплекс, который позволяет строить сопряженные нестационарные неизотермические модели гидродинамики и физико-химии процесса при движении флюида к месту разгрузки. Это позволило перейти от условного времени, определяемого степенью взаимодействия вода-порода, к реальному времени от начала жизни магматической камеры, продуцирующей тепло и флюид.

В представленной работе разработаны физико-химические и термодинамические модели формирования, эволюции и функционирования гидротермальных систем с количественным описанием процессов миграции и отложения при взаимодействии флюида с вмещающими породами и разгрузке на поверхность, что и выносится на защиту в виде трех научных положений.

Первое защищаемое положение: Термальные растворы, разгружающиеся в зонах активной вулканической деятельности, имеют контрастный состав. В основном они ультракислые, окисленные и содержат высокие содержаниями Cl^- , SO_4^{2-} , SiO_2 , Al, Fe, в отдельных случаях NO_3 , K, B, Mn, Zn, Cr, Ni, Sr, Rb, As. Формирование близонейтральных и субщелочных вод на одной термальной площадке с кислыми источниками возможно за счет взаимодействий воды флюидов с горными породами, а также смешения с поверхностными водами.

В доказательство этого положения приводиться большой фактический материал, характеризующий особенности распределения в термах кислотности, содержания сульфата, хлорида. Низкие значения pH терм обусловлены поступлением из магматического очагов по жерлам вулканов газообразных соляной и серной кислот, которые растворяются в воде после фазового перехода газ-раствор. Кислые растворы благоприятствуют интенсивному растворению вмещающих пород, в результате чего в термах обнаруживаются граммовые содержания алюминия, цинка, десятые доли грамма калия, железа, кремния и др. Но и после такого интенсивного взаимодействия с породами термы остаются кислыми. На основании чего автор делает вывод, что кислоты в больших объемах поступают к поверхности по хорошо проработанным каналам и не успевают нейтрализоваться в результате реакции гидролиза с алюмосиликатами. В местах с

относительно низкой проницаемостью формируются термы с околонеутральным pH растворов. Они могут располагаться в нескольких метрах от выхода кислых вод. Установлена линейная зависимость содержания ряда химических элементов в растворе от их содержания во вмещающих породах. Но концентрация некоторых элементов в растворе выпадает из установленной линейной зависимости, так как они привносятся в раствор потоками флюида – S, Cr, Ni. Из вмещающих гидротермы пород при сернокислотном выщелачивании выносятся кремнезем, щелочные металлы, кальций, магний. Из микроэлементов наиболее активно выносятся серебро, кадмий, сурьма, теллур, йод, бром. Мышьяк многократно перераспределяется между жидкой и твердой фазами под воздействием магматического флюида. С магматическими газами в гидротермальные растворы поступают галогены, сера и микроэлементы в анионной форме.

Второе защищаемое положение. Химический состав термальных источников определяется ступенчатой трансформацией поднимающегося флюида на геохимических барьерах: взаимодействием флюид-порода, фазовым разделением, окислительно-восстановительными реакциями, геоструктурными особенностями подводящих каналов. Наиболее эффективным механизмом концентрирования химических элементов является отделение паро-газовой фазы (конденсата) от солевого остатка (сепарата) при декомпрессионном кипении флюида. Наличие барьеров фазового разделения в близ поверхностном пространстве (до 100 м) изучаемых вулканов подтверждено методами малоглубинной электроразведки.

Диссертантом методами малоглубинной геофизики выявлены границы подповерхностных фазовых переходов. Гидротермальные объекты выделяются в виде аномалий пониженного удельного сопротивления до глубины несколько метров. По данным частотного зондирования выделяется коническая структура подводящих каналов, которые на поверхности проявляются грязевыми котлами. Показано, что состав кипящих котлов имеет контрастные характеристики, как по физико-химическим параметрам, так и по составу растворов. Общая минерализация растворов котлов варьирует от 4.9 до 80 г/л и связана отрицательной зависимостью с кислотностью растворов. Основные анионы во всех пробах котлов – это сульфаты и хлориды. Очень высокие концентрации хлоридов (до 70 г/л) являются основной особенностью котлов. Автор указывает, что высокохлоридный состав магматических газов свидетельствует о дегазации малоглубинной магматической камеры. Между общей минерализацией и концентрацией хлоридов диссертантом установлена положительная корреляционная зависимость. Изменения в уровне содержания хлоридов на протяжении 6 лет наблюдений составляли 1.5 – 3 раза, соответственно изменялась и общая минерализация. Вариации этих параметров, по-видимому, определяются метеорологическими условиями, т.е. степенью разбавления магматических флюидов метеорными водами, поставляемыми тающими снежниками на склонах фумарольного поля. Концентрации хлоридов увеличиваются с понижением pH, в то время как концентрация сульфатов изменяются незакономерно. Диссертантом установлено, что наиболее подвижные элементы, поступающие в растворы, это компоненты присутствующие в виде анионов: B, As, Sb, Bi, Se. Затем идет группа металлов: Cu, Zn, Pb, Ni, Fe, Co. Элементы, проявляющие амфотерные свойства, плюс Ag и Na составляют третью группу по подвижности (U, Al, V, Cr, Mn). Элементы первой группы привносятся из более глубокого источника, очевидно, с магматическими флюидами, они очень подвижны, накапливаются в верхних частях гидротермалитов, что и

обуславливает появление аномалий в твердом веществе и растворах. Металлы интенсивно выносятся из пород и перераспределяются в кипящих котлах между растворенной и взвешенной фазой. Инертные элементы в небольшом количестве все же поступают в растворы из вмещающих пород, которые, превращаясь в метасоматиты, заметно обедняются ими.

Состав поровых растворов термальной площадке более однороден, чем растворов котлов. Они представляют собой высокоминерализованные рассолы с общей минерализацией 16 – 95 г/л. Соотношение Cl/SO_4 в поровых растворах ниже, чем в растворах котлов, вследствие более низких концентраций Cl и более высоких – SO_4 . Концентрации и соотношения основных катионов (K , Na , Ca , Mg , Fe , Al) также весьма отличаются от таковых в растворах котлов. Основными микроэлементами являются V , B , Ti , Mn , содержания которых превышают 150 мг/л. Очень высоки концентрации As , Zn , Cu , Cr , Li , Zr , Sr , Ni , Co . Концентрации Cr и Ni в поровых растворах ниже, чем в растворах котлов, но уровень Co , Ti , V экстремально высок. Поровые растворы термальных площадок формируются, несомненно, при участии поднимающегося флюида. При этом идет их концентрирование вследствие интенсивного испарения с поверхности. Такие площадки представляют собой пример близповерхностного геохимического барьера, на котором идет разделение флюида на паро-газовую и жидкую фазы. Наличие проницаемых трещинных зон или открытых каналов ведет к разгрузкам концентрированных рассолов. При движении по хорошо проницаемым зонам раствора, подвижная часть поровых вод может вовлекаться в вертикальный транспорт, тем самым, изменяя состав остающейся жидкой фазы. Результирующий состав поверхностных разгрузок определяется сложными процессами дифференциации составов при испарении, вертикальной и латеральной миграции растворов. Подобный же механизм разделения на жидкую и паро-газовую фазы можно зафиксировать в серных фумаролах, когда по каналу уходит газовая фаза, а в виде поровых растворов во внутренних частях постройки остается насыщенная жидкость. На основе корреляционного анализа выделено три типоморфные ассоциации элементов, их доленое распределение в растворах указывает на соотношение глубинного флюида и метеорных вод в составе растворов источников. Газогидротермы фумарольных полей характеризуются наибольшей долей глубинной составляющей, в растворах кратерных озер большее значение приобретают воды поверхностного происхождения. В целом защищаемое положение обосновано приведенным фактическим материалом.

Третье защищаемое положение. Разнообразие состава термальных источников, выходящих на поверхность обусловлено разнообразием структур подводящих каналов. Такие факторы как температура, давление, степень и время взаимодействия вода/порода, фазовый состав флюида определяют «профиль» каждого конкретного термального источника. В свою очередь все перечисленные факторы зависят от размера, формы и структуры (пористость и проницаемость) флюидопроводников.

Доказательство этого положения приводится в главе 5, которая посвящена геофизическим исследованиям на термальных полях. В главе приводятся результаты в виде рисунков распределения электрического сопротивления, частотного зондирования, электротомографии, температуры. На основании этого делается вывод, что на термальных площадках на небольшой глубине образуется фазовый барьер, на котором поднимающиеся с глубины гидротермальные растворы разделяются. В котлы поступает и кипит «сепарат» с аномальными содержаниями многих химических элементов.

Присутствие этих растворов в поровом подповерхностном пространстве площадок маркирует зоны с низким удельным сопротивлением. Отделяющийся конденсат уходит в виде парогазовой смеси с более высокой температурой, но с существенно меньшей электропроводностью. По результатам геофизических исследований на термальных полях фиксируется парогазовая зона, которая к поверхности трансформируется в зону высокоминерализованных растворов.

Исследование глубинного строения термальных полей оз. Кипящее методом электротомографии продемонстрировало наличие мощных каналов, поставляющих гидротермальные флюиды к поверхности. Конфигурация каналов изменчива, она определяется наличием горизонтов или блоков плохопроницаемых пород. Разнообразие составов в поверхностных разгрузках в большой степени определяется внутренней структурой полей: наличие трещинных каналов позволяет подъем к поверхности растворов из низкоомной зоны, а присутствие относительно непроницаемых блоков не дает возможности выходов растворов с большой долей глубинного компонента. На профилях электротомографии с высокой степенью контраста по удельному электрическому сопротивлению зафиксирован подводящий канал, по которому идет транспорт высокоминерализованных растворов с глубины на поверхность озера.

Методом численного моделирования показано, что в зависимости от отсутствия или наличия флюидоупора над промежуточной магматической камерой могут развиваться контрастные типы гидротермальных систем. попадая на разные пути развития, гидротермальная система При совершенно идентичных химических свойствах даст принципиально различные конечные результаты. Динамика температур определяет фазовый состав флюида и, как следствие, его способность к транспортировке тех или иных химических компонентов. Отложение микрокомпонентов зависит от формы переноса - в газе или растворе.

Несомненным достижением диссертанта является результаты исследования вещества грязевых котлов. В работе показано, что при сернокислотном выщелачивании происходит полное преобразование базальтов. Метасоматическое замещение начинается с растворения плагиоклаза, пироксена, обильного окварцевания основной массы. В минеральном составе вновь образованных метасоматитов основными являются опал, гипс - ангидрит, реликты анортита; в качестве второстепенных минералов в них присутствуют сульфиды: пирит, марказит, самородная сера. Примесными минералами являются различные водные сульфаты (апджонит $-MnAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$, пиккеренгит $-MgAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$, винебергит $-AlSO_4(OH)_{10} \cdot 7H_2O$, англезит, тенардит, бутлерит), антофиллит. Породы термальных площадок представляет собой полностью преобразованное вещество, в котором не остается реликтов вмещающих базальтов. Основными минералами в этих породах являются самородная сера и опал, распространен ангидрит. В небольшом количестве определены редкие сульфиды: калининит $-Cr_2ZnS_4$ и вилламанинит $-CuS_2$, бассанит, клиноцоизит. Взвесь кипящих котлов представляет собой смесь каолинита-сметита, пирита, марказита, меньше в ней кварца, алуногена, ангидрита и некоторых других примесных минералов: самородной серы, талька, бутлерита.

Сделано предположение, что образование пород термальных площадок и взвеси в котлах шло под действием несколько разных процессов. Парогазовая смесь, поднимающаяся по относительно «сухим» породным структурам, реализуется в виде струй, фумарол, парящих участков. Если же поднимающийся флюид смешивается с

большим количеством поверхностных вод, происходит их кипение в виде котлов, а состав булькающей взвеси формируется из тех же базальтов, при взаимодействии с сернокислыми растворами.

Изученные микроэлементы разделены на несколько групп по их поведению в процессе выноса-отложения в системе «метасоматиты - термальные площадки - взвесь котлов». В первую группу входят 4 элемента - Te, Se, As, Sb. Общей для них тенденцией является накопление в верхних частях термальных площадок и во взвеси котлов. Метасоматиты немного обогащены мышьяком, но теллур, селен и сурьма в них не обнаружены. Галогены (I и Br) обнаруживают различное поведение. Иод выносятся из метасоматитов, обогащая термальные площадки и взвесь котлов. Бром немного накапливается в метасоматитах, и еще больше – в термальных площадках. В метасоматитах отмечается небольшой привнос олова, остальные металлы либо остаются на том же уровне, что и в базальтах, либо выносятся. Делается вывод, что метасоматоз вмещающих пород идет со значительным привносом анионогенов и галогенов, которые распределяются между вторичными преобразованными породами (метасоматитами, новообразованиями на термальных площадках, взвесью котлов), заметно обогащая их по сравнению с вмещающими базальтами. Металлы, содержащиеся в примесной форме в базальтах, активно перераспределяются при сернокислотном выщелачивании, о чем свидетельствует большое разнообразие в содержаниях металлов растворов и взвеси котлов.

Поставленные в диссертации задачи выполнены. Диссертантом показано, каким образом происходит формирование разнообразных по химическому составу гидротермальных проявлений на вулканах Камчатки и Курильских островов.

В диссертации изложены результаты многолетних теоретических и прикладных исследований, выполненных лично автором, либо при его непосредственном участии при выполнении различных научных программ. По теме диссертации опубликовано 80 работы, в том числе 3 монографии, 15 статей в журналах из списка ВАК. Автором созданы и зарегистрированы 3 базы данных по составу термальных вод и вулканогенных пород. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских научных конференциях. В автореферате отражены основные положения диссертации, содержание автореферата соответствует тексту диссертации.

Замечания

1. Литературный обзор проблемы состоит всего из 5,5 страниц. В нем не приведен детальный анализ состояния исследований в этом направлении. Обзор ограничивается констатацией фактов проведенных работ предшественников без анализа полученных ими результатов.
2. В диссертации не показано влияние на рассматриваемые гидротермальные системы поверхностных вод, нет данных по их химическому составу и объему поступлений.
3. В шестой главе, где приводятся данные о численном моделировании предполагается, что магматическая камера располагается на большой глубине, тогда как диссертация посвящена изучению малоглубинных гидротермальных систем. Здесь же приводятся данные о поведении золота, серебра и др. рудных

элементов (стр.182-184), которые накапливаются на глубинах в 1,5 км и более, а в диссертации речь идет о глубинах в несколько десятков метров.

4. Условные обозначения к рисункам главы 5 мелкие, их невозможно разобрать, не понятно какой у них масштаб. Рис. 5.3 не понятно где пройдены эти профили. Нужно было бы показать на карте или схеме фумарольного поля как они располагаются и соотносятся с местами разгрузки газопроявлений. Порой не понятно, что изображено на рисунке, к примеру, на рис. 5.4 не понятно, что обозначают цифры 6.0, 7.0, 8.0, 9.0; на рис.5.7 нет условных обозначений и не ясно, что обозначают цифры 0.49, 0.84, 1.3, 1.7, 2.2.
5. Имеются замечания к используемой терминологии: элементы, находящиеся в растворе в виде анионов называются «анионогенами». В геохимической литературе такой термин не применяется.

Заключение

Несмотря на указанные замечания, представленные в диссертации научные положения, вносят значимый вклад в развитие науки. Научные положения, выводы, рекомендации обоснованы представленным фактическим материалом, полученным с применением современных методов исследования, достоверность полученных результатов обеспечена использованием данных, полученных в аккредитованных лабораториях.

Диссертация «Физико-химическая модель формирования активных газогидротерм Камчатки и Курильских островов» соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям «Положением о порядке присуждения ученых степеней», «Положением о совете по защите диссертаций...», требованиям установленным ВАК РФ, а ее автор Шевко Елизавета Павловна заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 –Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Зам.директора ГИН СО РАН,
Д.г.-м.н.



А.М. Плюснин

19.09.2018 г.

Подпись Плюснина Алексея Максимовича автора отзыва заверяю.

Начальник отдела кадров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук

Зангеева Светлана Альбертовна

«20» сентября 2018



