

На правах рукописи

ШЕВКО Елизавета Павловна

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ
АКТИВНЫХ ГАЗОГИДРОТЕРМ КАМЧАТКИ И
КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ**

**25.00.09 –Геохимия, геохимические методы поиска
полезных ископаемых**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Томск - 2018 г.

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С.Соболева Сибирского отделения Российской академии наук и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный консультант: доктор геолого-минералогических –минералогических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ **Шварцев Степан Львович**

Официальные оппоненты: Бычков Андрей Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры Геохимии, Геологический факультет, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ) г. Москва;

Кулаков Иван Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, член корреспондент РАН, заведующий лабораторией сейсмической томографии Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г.Новосибирск;

Плюснин Алексей Максимович, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН), г. Улан-Удэ.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Петропавловск-Камчатский.

Защита диссертации состоится «10» октября 2018 г. в 14 час 00 мин на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.170.03 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГБун Институт нефтегазовой геологии и геофизики им.АА Трофимука СО РАН, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2799/worklist>.

автореферат разослан « ___ » _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

Лепокурова Олеся Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Представляемая работа направлена на решение фундаментальной проблемы реконструкции механизмов функционирования и развития газогидротермальных систем активных вулканов Курило-Камчатской островной дуги. Фундаментальной целью является разработка количественных моделей формирования и транспорта гидротермальных флюидов, закономерностей изменения их состава по пути подъёма и взаимодействия с породами, определение источников вещества для контрастных типов газогидротерм. На основе комплексного подхода к исследованию активных вулканов, включающего методы геохимии, геофизики, петрологии, термодинамические расчёты решены вопросы генезиса, транспорта, концентрирования широкого круга химических элементов с проекцией на всю флюидо-магматическую систему.

Актуальность исследования определяется тем, что интерпретация процессов в вулcano-гидротермальных системах оставляет множество вопросов, поскольку прямые наблюдения и замеры параметров возможны только в приповерхностной части. Накопленные эмпирические данные свидетельствуют о многопараметрических взаимодействиях в системе «магматический флюид – вмещающая порода», для их объяснения необходимо определение источников вещества, механизмов рассеяния и концентрирования химических элементов. Физико-химическое и термодинамическое моделирование взаимодействий вода-порода является мощным инструментом определения закономерностей и особенностей миграции флюида, химических реакций на пути его движения, генезиса элементов в поверхностных разгрузках.

Состав современных активных вулcano-гидротермальных системы представляет собой своеобразную информационную запись обо всех этапах взаимодействия поднимающегося флюида с вмещающими породами. Прямые замеры и опробования всех частей активной гидротермальной системы позволят сделать выводы об условиях формирования газогидротерм, источниках вещества, формах переноса химических элементов. Состав как термальных, так и холодных вод является отражением многих превращений, произошедших с флюидом от момента формирования на больших глубинах до поступления на поверхность Земли. В работе описаны все этапы формирования термальных вод: отделение от магматической камеры, подъем по разрезу, фазовые переходы (разделение на газ и жидкость), смешение с пластовыми и поверхностными водами, взаимодействие с вмещающими породами.

Степень разработанности проблемы.

Проблемы действующих вулcano-гидротермальных систем во всем мире исследуются очень активно. Ежегодно в мире возрастает количество публикаций, касающихся геохимии и эволюции флюидов, но Россия по этому показателю находится во втором десятке стран (данные сайта www.webofscience.com). По мнению автора, причина кроется не столько в недостаточном уровне исследований, сколько в недоведении накопленного материала до публикации в международных журналах и сети «Интернет».

Изучение термальных вод и вулканических газов на Камчатке началось после первой публикации Пийпа Б.И. (1937). Результаты исследований термальных вод Камчатки и Курильских островов были опубликованы на русском языке Ивановым Б.В. (1956, 1967), Барабановым Л.Н. и Дистлером В.В. (1968), Басковым Е.А. и др. (1973), Мархининым Е.К. (1967), Мархининым Е.К. и Стратулой Д.С. (1977), Трухиным Е.П. (2003), Чудаевым О.В. (2000). Большое количество данных по газам, полученных в вулканических фумаролах и более, чем в 150 источниках с Камчатки и Курильских о-вов были опубликованы Рожковым А.М. и Верховским А.Б. (1990). Таран Ю.А. и др. (1986) и Таран (1988) представили полные данные по геохимии флюидов из высокотемпературных геотермальных систем Камчатки.

Мировая практика изучения термальных вод много шире. Данные по широкому спектру химических элементов и их ассоциаций в термальных водах позволяют с некоторой долей условности определить их возможный генезис и источники вещества [Giammanco et al. 1998, Aiurpa et al. 2000, Bortnikova et al. 2008, 2010 и др.]. Геохимические исследования гидротермальных проявлений на активных вулканах (термальные источники, фумаролы, грязевые котлы) дают информацию о глубинных взаимодействиях и физико-химических процессах, которые могут происходить в гидротермальных резервуарах [Giggenbach and Sheppard, 1989]. Кратерные озера являются накопителем магматогенных флюидов, разгружающихся на дне. Однако основной вклад в состав растворов озер вносят метеорные воды и их последующее взаимодействие с породами вулканической постройки.

Во многих случаях очень трудно определить долю глубинного или метеорного источника в составе термальных проявлений [Pasternak and Varekamp, 1994; Rowe et al., 1995; Takano et al., 2000; Delmelle and Bernard, 1994; Varekamp et al., 2009; Bessonova et al., 2012 (*до 2014 года фамилия автора диссертации была Бессонова*)]. То же справедливо для множества термальных источников и фумарол, разгружающихся на склонах вулканов,

которые представляют собой смесь магматических флюидов и метеорных вод в разных пропорциях [Fazlullin, 1999; Shinohara et al., 1993; Taran et al., 1996; Aiuppa et al., 2001, Bortnikova et al., 2005]. Высокотемпературные фумаролы ($>700^{\circ}\text{C}$) обычно выносят на поверхность не только основные газы CO_2 , SO_2 , HCl , HF и др., но также множество металлов и металлоидов в виде газообразных хлоридов, фторидов и более сложных соединений, имеющих высокую подвижность при высоких температурах [Symonds et al., 1987; Symonds et al., 1994; Bernard and Le Guern, 1992; Taran et al., 2000; Korzhinsky et al., 2002; Zelenski and Bortnikova, 2005]. Конденсаты высокотемпературных вулканических газов содержат значительные количества металлов, а сублиматы и возгоны на фумаролах очень сходны по составу с эпитермальными рудными телами [Symonds et al., 1987; Hedenquist, 1995; Taran et al., 1995; Taran et al., 2002]. Для многих рудных элементов, именно на современных гидротермальных системах, убедительно доказана способность газов переносить существенные их количества [Бычков, 2013]. Это позволяет предполагать для низкотемпературных проявлений наличие во флюидоподводящей системе вулканической постройки зон фазовых переходов и, как следствие, - геохимических барьеров, на которых будут отлагаться рудные компоненты, которые станут основой для формирования эпитермальных месторождений.

Термодинамическое моделирование на сегодняшний день является одним из наиболее используемых методов при описании гидрогеологических систем. Безусловно, наиболее качественные модели с широким спектром учитываемых элементов и параметров построены для систем вода/порода [Гричук, 2000; Борисов и др., 2004]. Начиная с работ Хельгесона Г. (1967) и введения понятия «степени протекания реакции» в рамках равновесной термодинамики, развивается динамический подход, позволяющий учитывать развитие физико-химических процессов, разбивая их на локальные точки в пространстве и во времени [Helgeson et al., 1970, 1978]. К настоящему времени сложился подход равновесно-динамического моделирования, в котором в качестве аналога безразмерного времени, в том или ином виде, используется соотношение вода/порода (В/П) [Карпов, 1981; Шваров, 2000]. Имитация эволюции системы моделируется как последовательное достижение равновесия в каждом резервуаре с новыми порциями флюида. Подробно принципы динамического подхода при создании физико-химических моделей изложены в [Чудненко, 2010]. В некоторых программных комплексах предусмотрена возможность изменения ТР-условий на каждой последующей волне на определенную, заранее заданную, константу. Такой подход позволяет получать модельные расчеты, близкие к

природным наблюдениям [Гричук, 2000; Борисов, 2000]. Однако детальный анализ использования подобных приближений в геологических моделях свидетельствует об очевидной некорректности описания динамики развития системы при квазистационарных РТ-условиях. Попытки воссоединения гидродинамической и физико-химической модели для субмаринных систем были сделаны в работе [Тутубалин, Гричук, 1997], где результаты расчета первой модели были использованы авторами при построении второй. Однако ТР-профили, выбранные для разных временных срезов, тем не менее, оставались стационарными при расчете всех «волн» физико-химической модели. Современные численные программные комплексы зарубежных коллег, описывающих 2D и 3D модели «реактивных потоков» [Numerical..., 2003; Pruess, Xu, 2004 и др.], строились для сопровождения эксплуатации и разведки геотермальных месторождений или техногенных систем. Однако и в этих моделях нет главного для описания природы вулканогенных рудообразующих систем, - учета отделения газов от магматических тел и процессов их неизотермического взаимодействия с породами. Именно эти идеи являются базовыми для разработанных моделей обсуждаемых систем.

Предметом исследования стала модель вулcano-гидротеральной системы. Фактические данные по составу пород, растворов, конденсатов (более 800 анализов) были основой для создания физико-химических моделей, расчета равновесий и верификации результатов моделирования. Целью теоретических расчетов было воспроизведение условий формирования газогидротерм и форм переноса элементов во флюидном потоке и предсказание возможных зон дислокации геохимических барьеров и накопления или выщелачивания химических элементов из вулканогенных пород. Схематическое строение верхней части вулcano-гидротермальной системы, положенное в основу обсуждаемых результатов, представлено на рис. 1. Важно подчеркнуть, что именно неоднородность строения подводящих каналов (размеры, глубина, строение) и обсуждается в диссертационной работе.

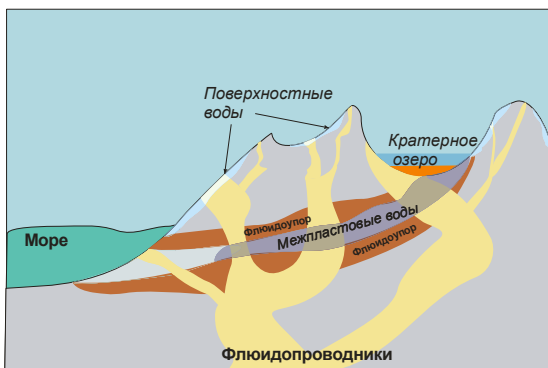


Рис. 1 Схематическое строение подповерхностного пространства вулканогидротермальной системы.

Объекты исследования фумарольные поля на трех вулканах Курило-Камчатской островной дуги - Мутновский (п-ов Камчатка), Эбеко (о-в Парамушир, Северные Курилы), Головнина (о-в Кунашир, Южные Курилы). Эти вулканы выбраны из-за сходного строения и, как следствие, состава пород и растворов. В основном постройки вулканов сложены андезитами, однако встречаются и слои базальтов с существенно повышенными содержаниями ряда элементов, которые обсудим чуть позже. Основное внимание уделено зонам проявления активных газогидротерм на поверхности, фумарольным полям, выходам термальных источников, хотя безусловно сами системы занимают намного больший объем.

Вулкан Мутновский расположен на северо-восточной оконечности Южно-Камчатской вулканической зоны, входит в состав Восточно-Камчатского вулканического пояса. Это один из самых больших и наиболее активных вулканов Южной Камчатки. Активная воронка представляет собой молодой взрывной кратер, возникший на последнем этапе деятельности Мутновского вулкана (рис. 2). Время образования этого кратера датируется возрастом 1200-1300 лет [Селянгин., 1993]. В настоящее время в этом кратере сосредоточены наиболее мощные и высокотемпературные парогазовые (фумарольные) выходы вулкана. Соответственно, здесь происходит максимальная массэнергетическая разгрузка вулкана. По данным Б.Г. Поляка [1966] и Ю.А. Тарана с коллегами [1991] активная воронка поставляет 200 т/сутки SO₂ и 1600 МВт тепловой энергии. Активность северо-восточного кратера характеризуется наличием в нем трех основных групп газогидротермальных выходов: двух обособленных участков на Донном фумарольном поле: Северного и Южного с температурами более 100°C, а

также разгрузок на Верхнем фумарольном поле, с температурами выше 300°C. Из-за высокой сейсмической активности и постоянного «сейсмического дрожания» земной коры [Кирюхин и др., 2005] на Донном поле наблюдается смещение мест и интенсивности фумарол и термальных источников. По-видимому, по этой причине на нем возникают аномальные по составу источники, исследование которых позволяет понять особенности гидродинамики и состава надкритических магматических флюидов в высоко проницаемых флюидопроводниках.

Действующий андезитовый вулкан Эбеко (50°41' с.ш., 156°01' в.д.) высотой 1156 м находится в северной части хребта Вернадского о-ва Парамушир (Курильские о-ва). Вулкан имеет сложное строение по типу «Сомма-Везувий», три его соприкасающихся кратера диаметром 250-320 м и глубинами 70-100 м вытянуты в меридиональном направлении [Горшков Г.С., 1957] (рис. 2). Функционирование гидротермальной системы влк. Эбеко выражено в наличии нескольких фумарольных и термальных полей на его склонах и внутри кратеров, а также реки Юрьева, наиболее полноводной кислой реки мира, берущей свое начало от Верхне-Юрьевских горячих источников на западном склоне вулкана. На поверхности этот гидротермальный поток проявляется выходами парогазовых струй, кипящих котлов, прогретыми площадками, кислыми кратерными озёрами и обширными полями гидротермальных изменений. В исторический период для вулкана Эбеко характерны эксплозивные фреатические и условно фреатомагматические извержения. Последние извержения вулкана были отмечены в 2009, 2010, 2011 гг. [Котенко и др., 2010, 2012].

Вулкан-кальдера Головнина — самый южный вулкан Курильских островов. Он находится на юге острова Кунашир, диаметр кальдеры более 10 км в основании и 4.5 км по гребню. Последнее проявление эруптивной деятельности в кальдере связано с фреатическим взрывом, в результате которого образовался кратер диаметром около 350 м, заполненный озером Кипящее (рис. 2). Образование этой воронки взрыва, по разным оценкам, произошло от 640-680 л.н. [Фазлуллин, Батоян, 1989] до 1000 л.н. [Разжигаева, Ганзей, 2006]. В настоящее время активность проявлена действием нескольких фумарольных полей. Наибольшее число выходов фумарол и термальных источников на поверхность расположено на дне и берегах оз. Кипящего. В работе выделяются три поля на берегах оз. Кипящего и одно на берегу озера Горячего.

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является 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. Граничные условия представленных моделей определяются их применимостью для объяснения конкретных полученных данных (химический и минеральный составы вещества) и соотносением с ситуацией *in situ* (газогидротермы Камчатки и Курильских островов).

Для достижения поставленной цели для каждой конкретной вулканогидротермальной системы необходимо было решить следующие задачи:

1. Определить состав и физико-химические параметры термальных источников на фумарольных полях исследованных вулканов. Выявить элементы, с помощью которых будет описан состав термодинамической системы.
2. 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.
3. Решить вопрос о путях миграции каждого конкретного элемента в зависимости от его геохимических свойств и физико-химических параметров флюида.
4. Выявить зоны накопления или рассеивания элементов в зависимости от температуры, давления, степени протекания реакции, состава флюидов и строения флюидопроводников.

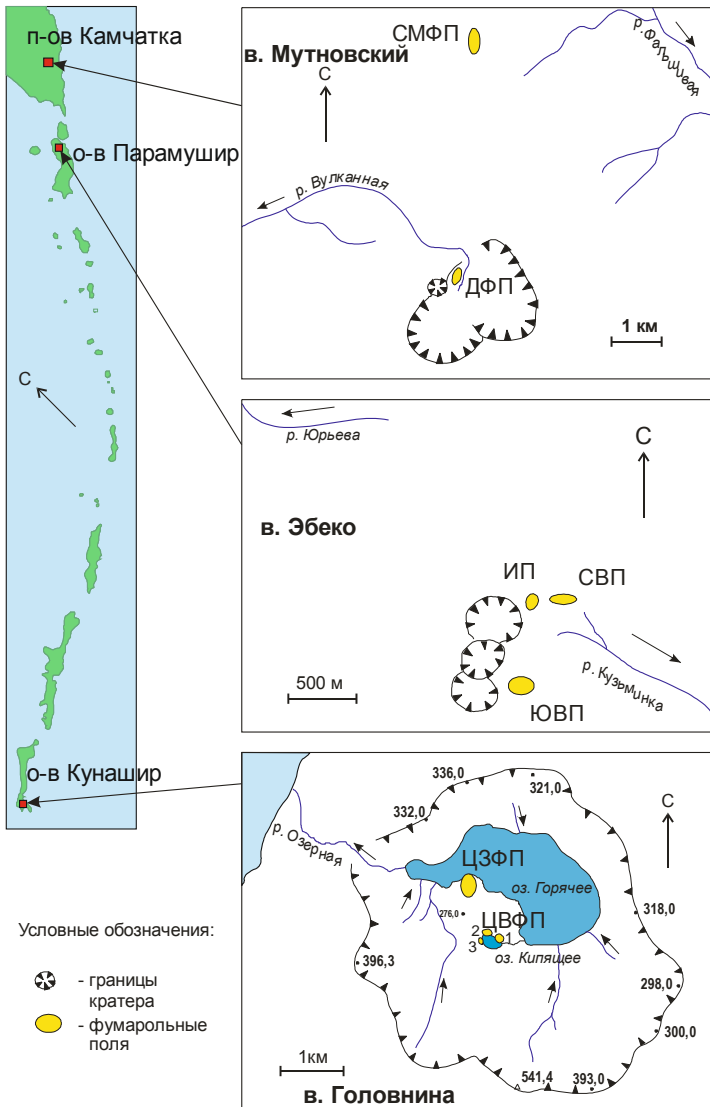


Рис. 2. Географическое положение объектов исследования.

Методы и подходы, фактический материал

Исследование основано на обширном фактическом материале по вулканам Камчатки и Курильских островов, накопленном автором за последние 20 лет. В работе использованы результаты методов из различных областей наук о Земле: геохимии, геофизики, петрофизики, петрологии, минералогии. Междисциплинарный подход к исследованию областей активного вулканизма позволяет получить комплексные данные о составе внешних проявлений флюидо-магматических систем:

- геохимия термальных растворов и парогазовых разгрузок;
- петролого-геохимические данные о породах вулканических построек;
- минералогия и геохимия вторичных образований (метасоматитов, возгонов, выцветов на термальных полях);

в то время как внутреннее строение флюидопроводников определяется с помощью методов электроразведки. Получаемая фактическая информация является основой для физико-химических расчетов и построения численных моделей применительно к конкретным флюидо-магматическим системам.

1. Полевые исследования на действующих вулканах Камчатки и Курильских островов: Мутновский (Южная Камчатка), Эбеко (о-в Парамушир), Головнина, Менделеева (о-в Кунашир):

- Собрана коллекция термальных вод и конденсатов путем опробования газогидротермальных источников, серных fumarol, термальных площадок. На выходах гидротерм проводились замеры неустойчивых параметров (pH, Eh, T, Fe²⁺/Fe³⁺).
- В разрезах вулканических построек опробован доступный спектр пород, как по возрасту, так и по составу и текстурно-структурным особенностям. Собрана коллекция метасоматически измененных вулканогенных пород в последовательности их гидротермальной проработки.
- В дополнение к петролого-геохимическому исследованию пород и растворов активных вулканов проведены геофизические исследования подповерхностного пространства термальных полей до глубины 7 – 100 м. Данные для геоэлектрической модели получены двумя методами: электромагнитным индукционным частотным зондированием (ЧЗ) в реализации ЭМС (электромагнитный сканер), методами сопротивлений (ВЭЗ) многоэлектродной установкой СКАЛА-48 (разработка ИНГГ СО РАН).

2. Лабораторные исследования пород и растворов включают в себя комплекс сертифицированных аналитических методов, которыми

располагает АЦ ИГМ СО РАН. В твердом веществе (породах вулканических построек, метасоматитах, вторичных минералах) определяется состав оксидов силикатной группы (метод РФА), элементы-примеси (методом РФА-СИ). Изучение петрофизических свойств пород (пористость, проницаемость, электропроводность с разной степенью флюидонасыщенности), проводилось в ИНГГ СО РАН, что позволило определить корректные параметры флюидопроводника для построения численной модели.

3. При физико-химическом моделировании использованы традиционные методы для описания взаимодействия вода/порода в равновесных гидротермальных системах [Карпов, 1980, Чудненко, 2010, Гричук, 2012, Борисов, 2010], а также собственные новейшие разработки автора.

Научные результаты, выносимые на защиту.

Собран, проанализирован, систематизирован и опубликован материал по нескольким вулканам Камчатки и Курильских островов за последние пятнадцать лет. Поскольку все исследования проводились по единой методике, то полученные данные корректно поддаются статистической обработке, часть наблюдений по отдельным объектам в течение нескольких лет позволяет проследить динамику изменения флюидного режима. При участии автора создан оригинальный программный комплекс (ПК), объединяющий ПК Селектор [Чудненко, 2007] и ПК Флюид [Шарапов и др., 2008], который позволяет строить сопряженные нестационарные неизотермические модели гидродинамики и физико-химии процесса. Сначала в модели рассчитываются теплофизические и гидродинамические параметры, которые используются далее при определении физико-химических равновесий. Такой подход позволил впервые перейти от времени условного (учитывающегося как соотношение вода/порода (В/П)), используемого в аналогичных ПК, к времени реальному, начинающему свой отсчет от начала жизни магматической камеры, продуцирующей тепло и магматогенный флюид. При расчете учитывается не только состав системы, но и строение подводящих каналов: их размеры, наличие или отсутствие флюидоупоров [Бессонова и др., 2011]. В результате расчетов можно предсказать появление и/или исчезновение фазовых границ в потоках магматогенных флюидов, их миграцию вдоль разреза со временем.

Научная новизна результатов исследования.

- Сбор, накопление, систематизация и публикация фактических данных;
- разработанных физико-химические модели функционирования гидротермальных систем для разных сценариев в зависимости от

строения флюидопроводников и степени взаимодействия вода-порода;

- идентификация зон фазового разделения флюида на геохимических барьерах в приповерхностных условиях с помощью сочетания геохимических данных с результатами геофизического зондирования;
- фактическое определение дифференциации химических элементов на фазовых барьерах (системы «котёл – фумарола», «поровые воды – свободные воды термальных источников») с количественной оценкой относительной подвижности элементов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в разработанных физико-химических и термодинамических моделях формирования, эволюции и функционирования вулcano-гидротермальных систем с количественным описанием процессов миграции и отложения химических элементов во флюиде при его взаимодействии с вмещающими породами и разгрузке на поверхности.

Систематизация и анализ данных по составу контрастных гидротерм имеет свою научную значимость, т.к. системно освещает закономерности геохимии вулканического флюида и поступления элементов из того или иного источника.

Отдельным пунктом фундаментальных знаний, полученных в ходе работы, является определение геохимических барьеров концентрирующих элементы, что было подтверждено фактически при исследовании внутреннего строения газогидротерм методами электроразведки.

Практическая значимость заключается в:

- определении закономерностей концентрирования элементов на определённых интервалах разреза в зависимости от строения флюидопроводника, что может быть применимо при объяснении процессов формирования эпитеpmальных руд;
- выявлении специфичной ассоциации химических элементов в термальных водах и газах влк. Мутновский и Эбеко (Cr-Ni-Co-ЭПГ-ТРЗЭ), свидетельствующей о наличии их источника (гипербазиты или рудные тела) в глубоких частях разреза под Южной Камчаткой и Северными Курилами;
- важным аспектом является обнаружение высоких концентраций потенциально токсичных элементов в термальных водах, применяемых в бальнеологических целях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых в пунктах: 3. «Разработка принципов и методов математической обработки геохимических данных, геохимического картирования биосферы, и математического моделирования геохимических процессов», 4. «Изучение химического состава всех типов природного вещества (земной коры, глубинного вещества Земли, гидросферы, атмосферы, живого вещества, взвешенного вещества) и закономерностей распространенности в них химических элементов и изотопов». 5. «Изучение состояния и форм нахождения химических элементов во всех типах природного вещества», 6. «Изучение закономерностей распределения химических элементов и изотопов в природных процессах», 7. «Изучение закономерностей концентрирования химических элементов в геологических процессах», 11. «Экспериментальное физико-химическое и математическое моделирование процессов массопереноса и поведения химических элементов и изотопов в системах и процессах в условиях, близких к природным»

Апробация и реализация результатов диссертации.

Результаты исследования по теме диссертации вошли в несколько десятков отчетов по теме работы. Автор диссертации была руководителем пяти инициативных и двух экспедиционных проектов РФФИ, Президентского молодежного проекта и нескольких проектов областного уровня, успешно завершённых. Разработанные методики физико-химического моделирования включены в курсы ГГФ НГУ.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертации автором опубликованы более чем в 80 печатных работах. Из них три монографии, в одной из которых автор диссертации является первым автором, а в остальных участвовала в написании нескольких глав. За последние годы автором созданы, опубликованы и зарегистрированы 3 базы данных по составу термальных вод и вулканогенных пород. Среди печатных работ 15 статей по теме диссертации в журналах рекомендованных ВАК.

Структура диссертации.

Текст диссертации изложен на 209 страницах, включающих ВВЕДЕНИЕ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ и шесть глав. В первой главе приведен обзор литературы за последние полвека (СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ). Во второй главе «МЕТОДЫ» описаны все полевые, аналитические и расчётные методы, использованные в работе. Особое внимание уделено полевым методам, которые являются основой результатов работы, и методам моделирования, разработанным при активном участии автора работы. В третьей главе

«ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ, ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ И ПЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ» приведены обобщенные геологические и геохимические фактические данные необходимые для понимания процессов взаимодействия флюидов с горными породами. Четвертая глава «ГИДРОГЕОХИМИЯ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ГЕНЕЗИС ЭЛЕМЕНТОВ В ИХ СОСТАВЕ» полностью посвящена особенностям состава термальных растворов на активных вулканах, в главе обсуждаются оригинальные данные по составу растворов термальных источников, фузарольных газов, вулканогенных пород. Пятая глава «ПОДПОВЕРХНОСТНОЕ СТРОЕНИЕ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ И ПОДВОДЯЩИХ КАНАЛОВ» демонстрирует результаты изучения строения вулcano-гидротермальных методами электроразведки и МТЗ и интерпретацию результатов с точки зрения гидрогеохимии. Шестая, заключительная, глава «ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВУЛКАНО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ» объединяет результаты исследования газов, растворов и пород в физико-химических моделях. Показаны различия развития вулcano-гидротермальных систем в зависимости от строения разреза и условий выхода газогидротерм на поверхность. В тексте диссертации присутствуют ссылки на 143 литературных источника.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Первое защищаемое положение.

Термальные растворы, разгружающиеся в зонах активной вулканической деятельности, имеют контрастный состав. В основном они ультракислые, окисленные и содержат высокие содержаниями Cl, SO₄²⁻, SiO₂, Al, Fe, в отдельных случаях NO₃, 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.

На современных активных вулканах Камчатки и Курильских островов широким распространением пользуется необычный тип горячих вод, которые отличаются особенно низкой кислотностью. В отдельных точках pH таких термальных вод характеризуется отрицательными значениями. В подавляющем числе случаев значения pH изменяются от -0,5 до 2,2 и редко повышаются до 4,4. Особенно низкие значения pH, среди обсуждаемых в работе вулканов, характерны для фузарольного поля Донное, где они колеблются в пределах от -0,5 до 1,9, среднее 0,56 (табл.1).

Другим отличительным свойством состава таких терм является необычно высокие содержания в них сульфат- иона, и/или хлорид- иона, которые избирательно концентрируются в термах разных fumarольных полей. Так, термальные воды Донного поля влк. Мутновского особенно богаты хлоридом, содержания которого за исключением 4^х точек из 31 превышают 5 г/л и достигают 74, среднее 19,2 г/л. В термах Северо-Восточного поля в вулкане Эбеко такие высокие содержания хлоридов установлены только в 2^х точках (9,5 и 7,4 г/л), а среднее из остальных точек составляет только 0,48 г/л. Значения рН во всех точках с содержанием Cl⁻ > 5 г/л составляет < 0,9 и опускаются до - 0,56 ед..

Важнейшим анионом, контролирующим низкие значения рН, является SO₄²⁻. В отличие от хлоридов, наиболее высокие значения сульфат-иона обнаружены в термах вулкана Эбеко (Северо-Восточное поле), где они колеблются за исключением 2^х точек из 28 от 1,0 до 16,0, среднее 6,7 г/л. Значения рН всех таких терм < 1,7, среднее 1,06. Также высокие содержания сульфат-иона встречены и в термах Донного fumarольного поля (вулкан Мутновский): в 74% точек его значения превышают 1 г/л и достигают 28, среднее 4,3 г/л, т.е. приближаются к термам Эбеко. Особенно высокие содержания SO₄²⁻ характерны для терм южной части Донного поля, где в 7^{-ми} отобранных пробах установлены концентрации этого иона от 1,7 до 28, среднее 10,9 г/л. Все такие термы отличаются низкими значениями рН: от - 0,24 до 2,7. Во всех других вулканах и их fumarольных полях также встречаются термы с высокими содержаниями сульфат-иона (г/л): в Северо-Мутновском до 2,8, среднее 1,4, Головнина до 2,1, среднее 1,1. Во всех точках терм с содержанием SO₄²⁻ > 1 г/л значения рН не превышают 2,8.

Приведенные факты однозначно свидетельствуют о том, что низкие значения рН терм обусловлены, главным образом, поступлением из магматических очагов по жерлам вулканов газообразных кислот HCl и/или H₂SO₄, которые растворяются в воде после фазового перехода газ/раствор в окислительной среде, о чем свидетельствуют данные о высоком значении Eh (табл.1). В редких случаях к этим кислотам добавляются и другие (HF, HNO₃, H₃BO₃, H₃PO₄, H₂CO₃, CO₂ и др.), что подтверждается данными по содержанию в термальных водах F, B, NO₃, PO₄ (табл. 1), но роль этих кислот относительно невелика.

В то же время, все кислые термальные растворы содержат в больших количествах химические элементы, которые не могли быть привнесены в газообразной форме, а были заимствованы из вмещающих горных пород, включая элементы гидролизаты, которых в обычных подземных водах всегда мало. Так, их содержания достигают (мг/л): Fe 480, Al 2740, SiO₂ 440, K 740,

В 160, Mn 11,2, Zn 1600, Cr 60, Ni 33, Ti 15, V 5,4, Sr 20, Rb 5,7 и т.д. Все это свидетельствует о том, что кислые воды очень быстро в значительной степени растворяют вмещающие алюмосиликатные породы и переводят большинство элементов в раствор.

Несмотря на такое активное взаимодействие с алюмосиликатами, термы остаются кислыми или значения pH в них растут незначительно. Этот факт свидетельствует о том, что термальные растворы поступают на поверхность по хорошо проработанным каналам настолько активно в настоящее время, что гидролиз их с горными породами с образованием гидроксильной группы OH⁻ не успевает нейтрализовать поступающие в систему объемы кислых флюидов. Нейтрализуется только незначительная доля кислот.

Кроме описанных кислых термальных растворов относительно редко на термальных площадках встречаются и околонейтральные воды с pH от 6.4 до 7.4. Для кальдеры Головина характерно соседство слабощелочных и ультракислых источников на расстоянии нескольких метров друг от друга. Максимальный процент таких терм относительно кислых встречен именно там (фумарольное поле оз. Кипящее), где он составил 31.2. В то же время, например, на Северо-Мутновском фумарольном поле встречена только одна точка из 15 с pH=7.35. Значения Eh таких вод в основном являются отрицательными, среднее -124 мВ (табл. 1), хотя их соленость только в одной точке незначительно превышает 1 г/л, среднее 0.56.

Химический состав источников естественно тоже крайне разнообразен. В таблице 1 приведены наиболее характерные анализы различных типов термальных вод обсуждаемых вулканов.

Для выяснения возможных источников химических элементов в термальных растворах содержания отдельных элементов в растворах котлов были отнесены к их содержанию в неизмененных андезитах (рис. 3). В результате элементы можно разделить на три группы. Первая группа включает те элементы, чьи концентрации в 1 литре раствора могут быть реализованы при полном извлечении их из 1 грамма породы. Это основные и некоторые примесные породообразующие элементы: K, Ca, Na, Fe, Al, Sr, Mn, V. Во вторую группу вошли элементы с содержанием в термальных растворах, недостаточным даже при допущении полного растворения породной матрицы в принятом соотношении: Mg, Ti, Ba, Zn, Cu, Zr. Третья группа составлена «аномальными» элементами. Концентрации последних существенно превышают количество в 1 гр. породы: Cr, Ni, Rb. Безусловно, основное значение в формировании состава гидротермальных растворов имеет сравнительная подвижность различных элементов.

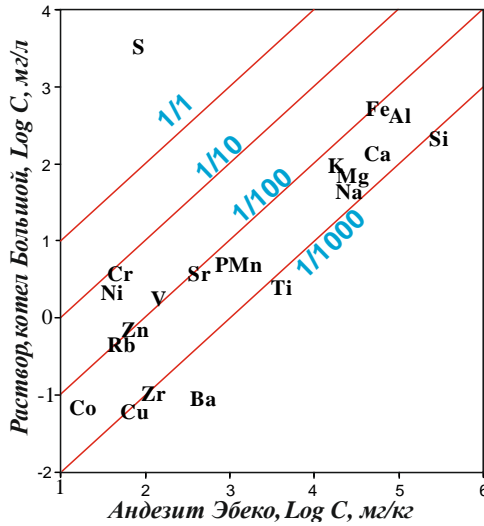


Рис. 3. Диаграмма Log концентраций элементов в растворе котла Большой в сравнении с содержанием в андезитах из вулканической постройки. Параллельные наклонные линии обозначают уровень содержания элементов в 1, 10 и 100 гр андезита при полном его растворении в 1 л раствора

Таблица 1.

Химический состав вод термальных источников

Параметры терм		влк. Мутновский									
		СМФП		Донное ФП		Влк. Эбеко		Влк. Головинна		ОколонеЙтральные	
		Пределы	Среднее	Пределы	Среднее	Пределы	Среднее	Пределы	Среднее	Пределы	Среднее
T ⁰ C		65-92	80,4	60-94	83,6	20-93	68,3	41-98	75,6	12-69	52,6
pH		1,6-4,2	2,67	-0,6-1,9	0,83	0,4-3,0	1,29	1,8-4,4	2,44	6,0-7,4	6,76
Eh мВ		150-450	283	240-715	464	300-641	448	-112-(+176)	-12,4	-347-(+192)	-124
SO ₄ ²⁻ , г/л		0,5-2,8	1,43	0,2-28,0	3,46	0,3-160	5,99	0,54-2,12	1,11	0,07-0,26	0,16
Cl, г/л		0,01-0,18	0,04	0,1-74,0	19,2	0,01-9,5	1,79	0,03-0,39	0,08	0,09-0,18	0,102
HCO ₃ ⁻		-	-	-	-	-	-	-	-	60-420	203
F ⁻		-	-	0,01-115	17,3	0,01-38	7,56	0,1-2,5	1,33	0,2-2,8	1,18
PO ₄ ³⁻		0,4-5,2	1,47	0,7-120	22,5	1,5-23	10,9	0,1-0,4	0,27	0,3-0,45	0,37
NO ₃ ⁻		0,5—6,4	3,15	3,0-960	184	-	-	0,7-68	13,7	2,1-5,1	3,02
Ca ²⁺		2,9-55	22,3	40-700	208	37-420	165	35-162	97,7	15-132	69,0
Mg ²⁺		3,0-57	16,3	1,4-160	49,8	13-180	71,6	0,2-32	14,7	1,5-32	13,1
Na ⁺		3,5-14	6,07	2,0-500	108	17-230	95,5	14-265	126	9,7-98	55,8
K ⁺		0,6-38	5,53	0,8-740	134	5,9-200	76,0	2,0-24	11,8	0,6-9,0	4,98
NH ₄ ⁺		0,5-130	32,7	0,1-33,0	6,35	-	-	-	-	1,9-35	21,0
SiO ₂		32-250	143	7,9-440	227	64-420	259	76-330	230	32-200	123
Fe _{сум}		12-480	156	4,1-7820	660	3,0-270	187	0,01-30	10,3	0,007-0,12	0,09
Fe ³⁺		1,2-360	115	3,2-3200	324	-	-	0,7-27	12,0	-	-
Al		-	-	110-2710	743	40-681	344	2,0-30,1	20,5	0,02-0,17	0,09
B		0,01-0,21	0,05	0,5-160	34,7	0,21-7,6	3,56	0,01-15,3	6,08	0,04-0,92	0,41
Mn		0,3-2,3	0,98	0,03-11,2	2,58	0,7-18,1	6,17	0,01-4,6	1,33	0,01-1,5	0,56
Zn		0,1-1,0	0,47	0,1-6,9	0,77	0,01-1700	0,52	0,02-2,8	0,39	0,005-0,03	0,012
Cr		0,06-0,12	0,08	0,06-60	8,45	0,01-3,6	0,52	-	-	-	-
Ni		0,01-0,09	0,04	0,01-33	3,82	0,01-0,6	0,21	-	-	-	-
Ti		0,01-0,07	0,04	0,02-15	3,02	0,01-2,3	0,22	0,002-0,012	0,006	-	-
V		0,03-0,82	0,32	0,04-5,4	1,47	0,12-1,7	0,93	0,006-0,06	0,034	0,002-0,01	0,004
Sr		0,04-0,52	0,16	0,1-20	4,21	0,18-4,2	2,19	0,08-0,28	0,15	0,03-0,32	0,16
Ba		0,01-0,87	0,11	0,02-2,7	0,77	0,005-0,15	0,04	0,02-0,13	0,07	0,003-0,17	0,07
Cu		10-290	79,0	5,0-880	174	5,0-170	35,0	3,0-13,0	8,78	5,0-10	7,23
Co		20-190	54,0	10-2740	201	65-110	83,2	2,0-4,0	2,43	2,0-2,8	2,51
Li		4,0-10	7,4	1,0-160	52,5	8,1-210	64,5	3,0-130	50,1	4,0-38	24,7
Rb		-	-	6,2-520	118	47-590	286	110-430	222	80-150	100
As		-	-	60-5700	548	310-2600	1535	75-2400	635	-	-
Sb		-	-	0,4-650	81,2	-	-	85-150	112	69-165	120
Mo		-	-	20-990	203	-	-	-	-	-	-
Количество анализов		15		38		28		12		5	

Однако, допуская, что породная матрица растворяется полностью, для достижения обнаруженных концентраций в растворах котлов для этих элементов необходим либо дополнительный источник, либо существование условий концентрирования в определенных участках разреза. Вместе с тем, высокие концентрации некоторых ассоциаций (например, Ti-V-Co-Ni-Cr, Al-Li-Be и др.) не могут быть реализованы в растворах без дополнительных источников их поступления и концентрирования на фазовых барьерах.

Состав метасоматически измененных пород Северо-восточного и Южного фумарольных полей дает дополнительную информацию о геохимии гидротермальной проработки пород в близповерхностном пространстве. Из андезитов, которыми сложена постройка Эбеко, при сернокислотном выщелачивании, выносятся кремнезем и щелочные металлы, кальций перераспределяется в породах. Интересно, что и Mg активно включается в процесс выноса – переотложения, хотя считается, что в процессах кислотного выщелачивания он довольно инертный элемент. Отчетливо фиксируется обогащение TiO₂, очевидно, за счет пассивного обогащения в процессе выноса других, более подвижных компонентов. В микрокомпонентном составе идет обеднение метасоматических разностей практически всеми обнаруженными элементами (табл. 2). Наиболее активно в этом процессе выщелачиваются металлы Ag и Cd, аниогены (Sb, Te), галогены (I, Br). Интересно, что мышьяк остается на том же уровне, что и в андезитах, но, видимо, не за счет своего инертного поведения, а, наоборот, вследствие многократного перераспределения в процессе газогидротермального транспорта. В одном из образцов метасоматитов обнаружена высокая концентрация мышьяка (см. табл. 2 - № ЭП-6). Кроме того, вторичные минеральные образования и гидрогенные осадки в котлах также содержат значительные количества мышьяка, что, конечно же, свидетельствует об его активном привносе с магматическими газами.

Так же как для растворов вулкана Эбеко, подвижность элементов была оценена в сравнении с лавовыми потоками различного состава на влк. Мутновский. Логарифмическая диаграмма для растворенных форм основных и примесных элементов в воде котлов на Донном поле по отношению к составу оливиновых базальтов показана на рис. 4.

Выяснилось, что наиболее подвижные элементы при взаимодействии магматического флюида с породами разреза – это галогены (Cl, I, Br), В и S. Близки к ним по подвижности аниогенные элементы (As, Sb) и некоторые металлы (Mo, Ag). Очевидно, это свидетельствует о внешнем источнике этих элементов – магматических газах, поставляющих галогены, серу и аниогены в гидротермальные растворы. Основные породообразующие

элементы (Mg, Ca, Si, Ti, Mn) могут достигать высоких концентраций в растворах при масштабной гидротермальной проработке пород, когда приблизительно 10 г базальта растворится в 1 литре раствора (соответствующего состава, например, котла СДП-2). Однако концентрации таких элементов, как Cr, Ni, Zn, Ba в растворах существенно выше, чем даже при растворении 10 г базальта. Как свидетельствуют предшествующие исследования кислых вулканических вод [Delmelle and Bernard, 1994; Villemant et al., 2008], анионный состав и pH определяются вкладом магматических газов. Катионы, главным образом, извлекаются из вмещающих пород при их гидротермальной проработке, прямо в выходы гидротерм или через промежуточные подземные резервуары. Но, как видно из балансовых оценок, лишь за счет растворения пород достичь достаточных концентраций элементов в растворах, разгружающиеся на Донном поле, невозможно.

Таким образом, неизбежен вывод – генезис флюидов един, но пути миграции делают каждый термальный источник уникальным. Объяснение такого рода явлений следует искать в подповерхностных взаимодействиях флюид/порода и изменениях состава растворов на геохимических барьерах.

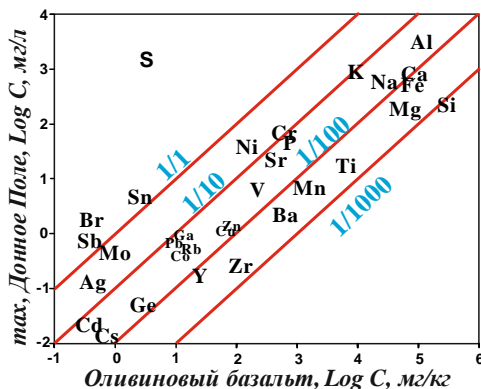


Рис. 4. Анализ сравнительной подвижности химических элементов в растворах грязевых котлов на Донном поле влк. Мутновский в сопоставлении с составом оливинового базальта из фундамента.

Таблица 2

Содержание микроэлементов в метасоматически проработанных породах влк. Эбеко, г/т

	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Pb	Th	U	Ag	Cd	Sn	Sb	As	I	Cs
ПР-30	130	45	36	66	62	15	46	400	20	110	2.5	1.1	8.4	4.9	2.1	0.53	0.26	0.95	0.2	-	-	2.3
ЭМ-1	102	15.3	18.5	34.8	56	11.7	42	389	21.1	91	1.44	2.87	15	5.3	1.19	-	-	-	-	-	-	1.1
ЭМ-2	110	14.7	30.2	99	64	12.2	36.1	427	21.5	78	1.48	2.14	10	5.0	1.2	0.54	0.42	2.07	0.69		0.49	0.89
ЭМ-3	127	13.9	22.8	81	71	13.5	46.6	416	22.1	94	1.18	3.02	16	4.3	1.21	0.99	0.46	6.74	-		0.21	4.51
ЭМ-4	156	18	32.4	108	64	10.5	24.5	492	17.3	43.7	0.46	0.66	5.2	2.51	0.8	0.73	0.39	1.77	0.17		0.68	1.38
ЭМ-5	115	15.9	22.7	61	65	12.8	38.2	424	21.8	83	0.82	1.89	12	4.54	1.22	-	-	-	-		-	0.43
ЭМ-6	126	13.2	26	59	64	11.2	33.4	367	17.9	68	1.06	1.32	12	3.28	1.2	-	-	1.98	0.28		0.2	1.57
ЭП-2	70	7.91	17	21.5	52.7	14.2	35.3	396	18.8	92	1.81	3.53	8.4	3.04	1.16	-	-	-	-		-	0.94
ЭП-4	88	8.05	12.4	58	50.8	12.4	37.6	392	18.1	95	1.87	2.24	16	3.42	1	0.35	0.24	1.48	-		1.13	3.62
ЭП-6	72	-	2.46	20.7	64	10.3	44.9	41.4	11.9	113	2.76	1.99	7.7	3.41	1.06			2.76	0.34	6.7	1.23	5.69
ЭП-7	92	8.27	9.9	63	57	13.7	48.5	364	28	103	1.48	2.81	15	3.97	1.49	-	-	-	-		-	1.69
ЭП-8	92	10.5	13.5	67	54.4	13.3	43.9	306	19.4	91	1.69	2.1	13	5.56	1.02	0.37	0.15	1.27	0.8		-	4.06
ЭП-9	90	11	22	49.2	65	11.1	39.7	331	19.2	80	1.45	2.83	15	3.7	1.14	0.56	0.78	2.21	0.2		1.3	4.3

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 химическим элементов является отделение парогазовой фазы (конденсата) от солевого остатка (сепарата) при декомпрессионном кипении флюида. Наличие барьеров фазового разделения в близповерхностном пространстве (до 100 м) изучаемых вулканов подтверждено методами малоглубинной электроразведки.

Для численного описания возможности смены состава термальных растворов в ходе взаимодействия с породами флюидопроводника применялась физико-химическое моделирование, поскольку три обсуждаемых в работе вулкана в основном сложены андезитами, то при моделировании использовался усредненный состав. Для понимания возможностей изменения состава растворов в ходе взаимодействия с породами постройки проведены термодинамические расчеты равновесия при взаимодействии флюида с разным количеством андезита при разных температурах. В результате формируются растворы от щелочных до ультракислых (рис. 5). Результаты расчетов демонстрируют, что всего несколько грамм андезита, ВСТУПИВШЕГО в реакцию с литром, достаточно для нейтрализации ультракислых растворов. Температура взаимодействия, безусловно, влияет на интенсивность процесса, но значение её не определяющее.

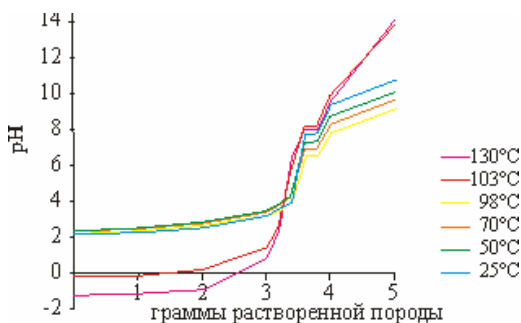


Рис. 5. Расчетная зависимость кислотности термальных растворов от количества растворенной породы и температуры.

Интересно отметить формирование растворов с отрицательными рН за счет кипения. Их количество ограничивается десятками долями процентов от общей массы флюида, однако, при взаимодействии с породами такие растворы предполагают совсем иной тип выщелачивания.

Как следствие выявляется второй механизм изменения состава флюидов – фазовые барьеры. Наиболее интересный и обсуждаемый вопрос - пути насыщения термальных растворов элементами, в том числе рудными. Была построена модель подповерхностного пространства термального поля, целью которой было выяснить различия в изменении состава флюидов и пород в зависимости от фазового состава флюида (рис. 6). В моделях различались лишь распределение давления в разрезе, которое зависит от наличия или отсутствия флюидоупоров (табл. 3).

Таблица 3

Значения температуры и давления в моделируемом разрезе

Глубина, м	20	16	12	8	4	0	0
T°C	250	200	180	150	120	80	30
P1, бар (А)	50	20	5	2	1	1	1
P2, бар (Б)	10	8	15	3	1	1	1

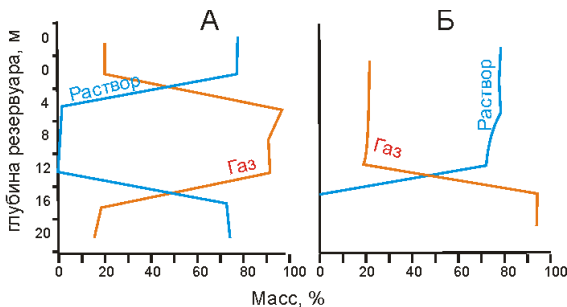


Рис. 6. Фазовый состав модели в зависимости от глубины для двух вариантов распределения температуры и давления (см. табл. 3).

Пути миграции магматогенных флюидов и, как следствие, фазовые переходы в них определяют состав термальных растворов и фумарольных газов, которые фиксируются на поверхности термальных полей. В зависимости от условий миграции магматогенного флюида, отсутствия или наличия флюидоупоров, в приповерхностном пространстве активных гидротермальных систем могут формироваться различные эпитеральные месторождения, связанные не с особенностями системы поставляющей флюид, а с фазовыми барьерами, встречающимися на его пути (рис. 7).

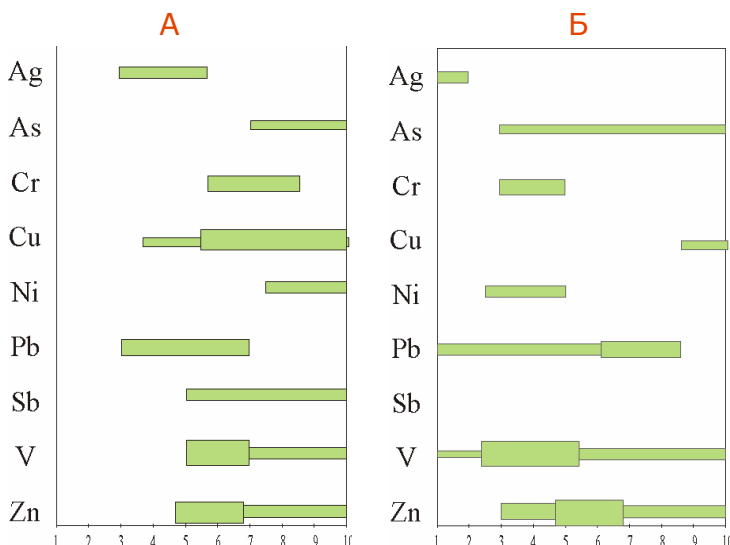
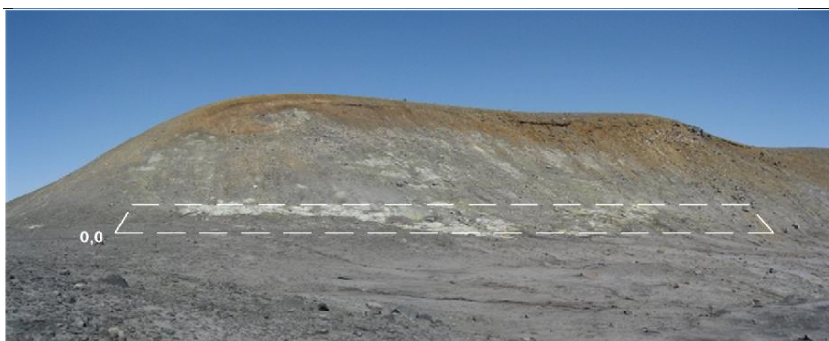


Рис. 7. Накопление рудных элементов в подповерхностной зоне в зависимости от времени существования гидротермальной системы и типа миграции.

Взаимодействие с андезитами приводит к повышению щелочности флюида и насыщению его по всем компонентам. Важно подчеркнуть, что даже при больших соотношениях В/П=20/1 на поверхность не будут подниматься кислые растворы. Происходит перераспределение вещества в разрезе – выносимые из нижней части элементы осаждаются выше и продолжают давать щелочную реакцию термальным растворам. Несмотря на высокую минерализацию и повышенное содержание всех макрокомпонентов, по микрокомпонентам растворы не достигают содержаний, фиксирующихся в термальных источниках. Так содержания хрома ниже на два порядка, никеля на три, а по магнию содержание превышено на 2 порядка. Это в очередной раз подтверждает, что формирование ультракислых термальных растворов невозможно при взаимодействии с вмещающими породами. Для образования подобных терм необходимо наличие высокопроницаемого химически инертного канала, по которому флюиды поднимутся от приповерхностной магматической камеры до поверхности Земли. Источником компонентов в случае с вулканом Мутновский могут быть более глубокие камеры базитового или ультрабазитового состава.

Методами малоглубинной геофизики для многих из обсуждаемых объектов выявлены четкие границы подповерхностных фазовых переходов.

Пути миграции магматогенных флюидов и, как следствие, фазовые переходы в них определяют состав термальных растворов и фумарольных газов, которые фиксируются на поверхности термальных полей. Ярким примером может служить Северо-Восточное поле вулкана Эбеко. Гидротермальные объекты хорошо выделяются в виде аномалий пониженного удельного сопротивления на картах распределения УЭС до глубины нескольких метров. Для Северо-Восточного поля по данным частотного зондирования выделяется коническая структура подводющих каналов (рис.8), которая указывает на близкое расположение гидротермального резервуара, предположительно на глубине 5-8 метров. Эти данные подтверждаются результатами электротомографии (рис. 9), где отчетливо видна структура резервуара, питающего систему котлов и фумарол.



Данные двухмерной инверсии

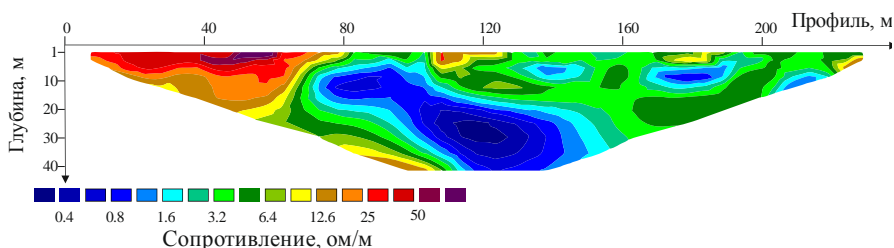


Рис. 8. Один из профилей электротомографии на Северо-Восточном фумарольном поле вулкана Эбеко.

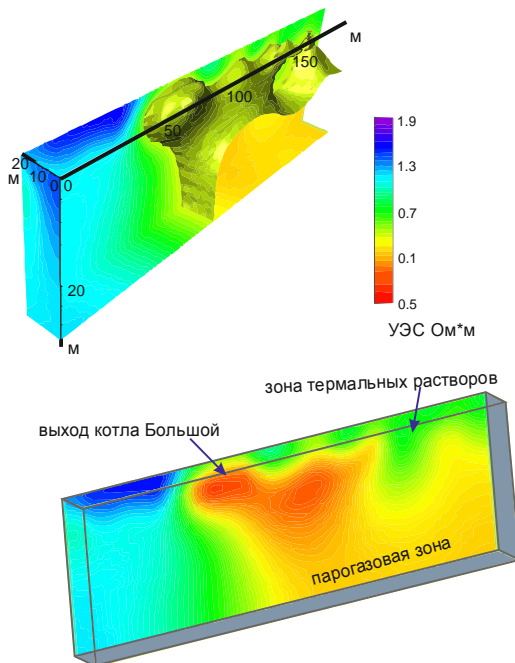


Рис. 9. Трехмерная модель и профиль удельного сопротивления среды для Северо-Восточного фумарольного поля влк. Эбеко.

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.

Реальный разрез построек большинства вулканов Курило-Камчатского региона под участками разгрузки активных гидротермальных систем не известен. Для наших моделей выбраны наиболее типичные для рассматриваемых вулканов системы с промежуточной камерой, расположенной на глубине около 2000 метров и являющейся источником тепла и магматических газов (рис. 10).

Как показано [Фролова Ю.В., Ладыгин В.М. 2008], вулканогенные породы, претерпевшие гидротермальные преобразования, обладают специфическим комплексом петрофизических свойств. Поэтому возникает

проблема сопряженного описания динамики преобразований состава пород и их петрофизических характеристик при воздействии на них потоков магматогенных флюидов с меняющимся химическим и фазовым составом (магматический газ, гидротермальный раствор или паро-газовая смесь).

В представляемой работе сделана попытка оценить изменение химического и фазового состава флюида в зависимости от наличия или отсутствия флюидопора в различных частях разреза. В основу теоретических построений положены фактические данные по петрофизическим свойствам пород, как свежих, так и гидротермально измененных. Важно подчеркнуть, что КАЖДАЯ разность вулканогенных пород имеет собственные характеристики пористости и проницаемости (не всегда находящиеся в очевидной зависимости), от которых зависят особенности потока флюида на разных этапах его эволюции.

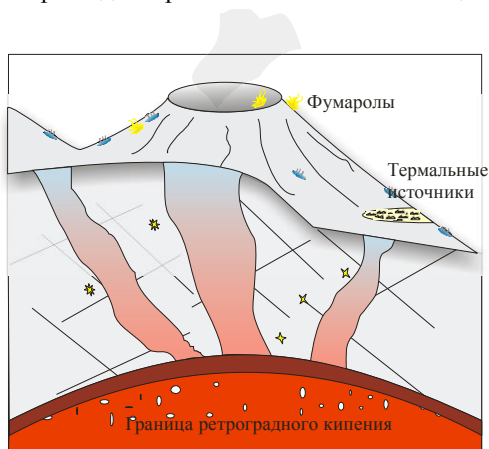


Рис. 10. Концептуальная модель вулcano-гидротермальной системы с малоглубинной магматической камерой

На основе разработанного автором подхода построен ряд моделей основанных на фактических данных по различным вулканам, главной особенностью которых является наличие промежуточной малоглубинной камеры, являющейся источником тепла и магматических флюидов. В нескольких вариантах разобраны особенности преобразования вулканогенных пород от структурных особенностей флюидопроводника. Как показано ниже, именно строение флюидопроводника определяет особенности флюидного потока, а соответственно и зон преобладания газов или растворов в различных частях разреза. На рисунке 11 представлена структурно-вещественная модель вулcano-гидротермальной системы.

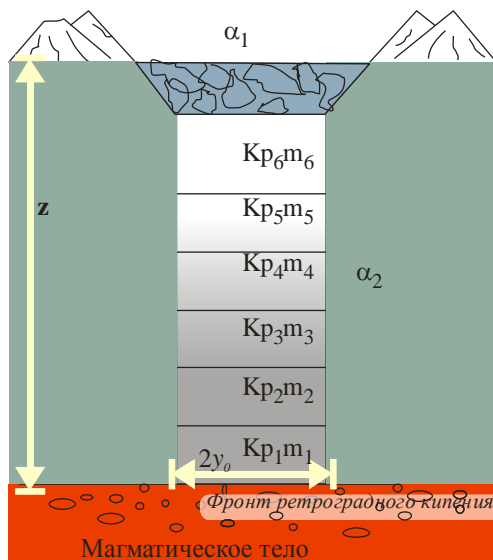


Рис. 11. Структурная схема модели Kp – проницаемость, m^2 , m – пористость, %, α_1 – коэффициент теплоотдачи на верхней границе, α_2 – коэффициент теплоотдачи боковой поверхности флюидопроводника, z – глубина залегания магматической камеры, $2y_0$ – ширина флюидопроводника.

Высоко проницаемая плоская зона трещиноватости, рассекающая слоистый разрез вулканогенных пород, имеет послойно меняющуюся пористость (m) и проницаемость (Kp). Боковые стенки флюидопроводника слабопроницаемы, поэтому далее учитываем только теплообмен потока флюида и вмещающих пород введением эффективного коэффициента теплоотдачи α_2 [Шарапов В.Н. и др, 2008]. На поверхности теплообмен флюида и атмосферы учитывается коэффициентом теплоотдачи α_1 .

Рассмотрено три варианта строения флюидопроводника (табл. 4): А – с увеличением проницаемости у поверхности земли; В – равномерно увеличивающаяся пористость и проницаемость в разрезе; С – над верхним контактом интрузива имеется флюидоупор, выше его по разрезу системы значения пористости и проницаемости аналогичны варианту В

Значения пористости и проницаемости слоев разреза, использованные при моделировании.

Глубина залегания, м	А		В		С	
	Пористость, %	Коэффициент проницаемости, м ²	Пористость, %	Коэффициент проницаемости, м ²	Пористость, %	Коэффициент проницаемости, м ²
0-100	10	10 ⁻¹³	10	10 ⁻¹³	10	10 ⁻¹³
300-100	7.5	10 ⁻¹⁴	7.5	10 ⁻¹⁴	7.5	10 ⁻¹⁴
500-300	5	10 ⁻¹⁵	5	10 ⁻¹⁵	5	10 ⁻¹⁵
1500-500	3	10 ⁻¹⁵	3	10 ⁻¹⁵	3	10 ⁻¹⁵
1800-1500	2	10 ⁻¹⁵	1	10 ⁻¹⁶	0.5	10 ⁻¹⁶
2000-1800	1	10 ⁻¹⁵	0.5	10 ⁻¹⁶	0.1	10 ⁻¹⁷

Результаты моделирования подтверждают, что в зависимости от строения разреза будут формироваться совершенно различные типы вулканогидротермальных систем со своеобразными проявлениями на поверхности. Для каждого из вариантов на разных временах развития характерны свои профили температуры и давления (рис. 12). Для варианта А на начальных этапах прогрев разреза идет не равномерно, однако после 300 лет работы промежуточной магматической камеры на поверхности достигаются экстремально высокие температуры и линейное распределение температуры в разрезе (рис. 12). При варианте В прогрев разреза проходит более равномерно, в верхней части разреза достигаются температуры среднетемпературного гидротермального процесса (260°C) лишь к 1000 годам. Вариант С отвечает условиям низкотемпературного гидротермального процесса, лишь на глубине до 1500 м температуры достигают 300°C, а в верхней части системы не превышают 120°C.

Если в первом случае на поверхность могут выходить газы с критическими температурами уже к возрасту 300 лет, то в случае наличия флюидоупора в той или иной части системы нельзя ожидать повышения температур на поверхности выше 200°C. Давление в системе будет повышено относительно литостатического вплоть до выхода флюида из под флюидоупора – в случае (В) на глубине 1500 м, в случае (С) на поверхности Земли.

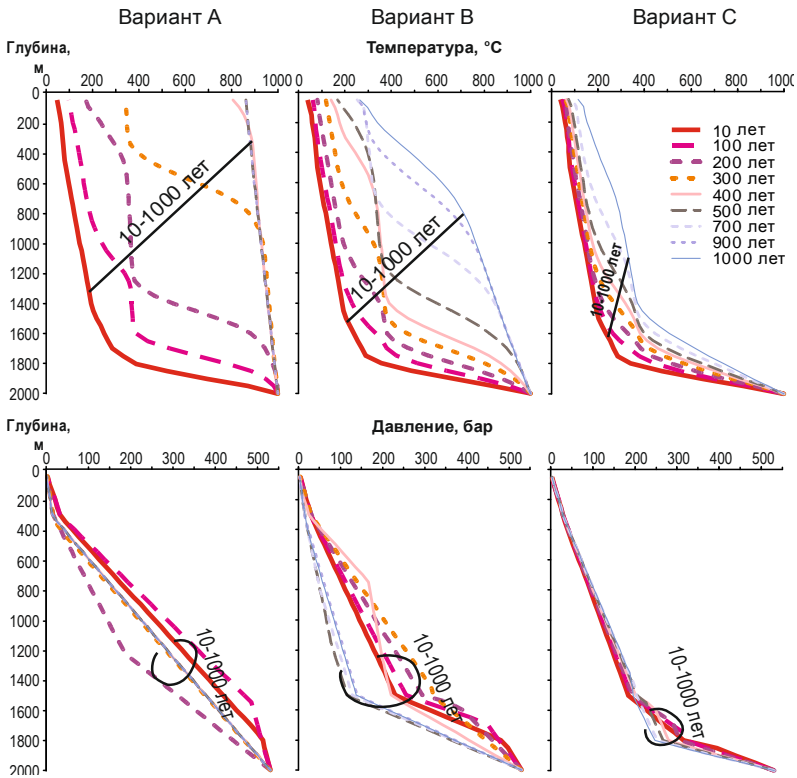


Рис. 12. Динамика температуры и давления в разрезе вулканогидротермальной системы по данным расчетов в зависимости от строения флюидопроводника.

Наиболее яркие различия между типами систем видны в фазовом составе (рис. 13). В зависимости от времени жизни системы и её структурных особенностей вдоль разреза на различных уровнях будут формироваться несколько фазовых переходов, а на поверхность будет выходить флюид разного химического и фазового состава. Следствием распределения температуры и давления являются фазовые переходы во флюиде (рис. 13). По сути, именно состояние флюида определяет особенности формирования разреза. Для варианта А преобладание раствора в разрезе возможно только в течении 100 лет развития системы, в дальнейшем конденсация высокоминерализованных рассолов будет происходить лишь у самой поверхности. Вариант В, с точки зрения фазовых переходов, достаточно контрастен – до 400 лет преобладающей фазой флюида является раствор, а

позже – газ. Зона конденсации флюидов в средней части разреза (850-600 м.) начинает формироваться после 700 лет. Низкотемпературный вариант С характерен безусловным преобладанием растворов выше 1600 м.

По результатам термодинамических расчетов можно с уверенностью заключить, что подъем на поверхность ультракислых термальных растворов должен проходить без взаимодействия с вмещающими породами, по хорошо проработанным каналам.

В подповерхностном пространстве термальных полей фиксируются фазовые барьеры, которые, очевидно, не только способствуют смене химического состава растворов, но и представляют собой зоны концентрации химических элементов, в том числе, и рудных.

Строение флюидопроводника определяет проявление газо-гидротермальной деятельности на поверхности и формирование геохимических аномалий внутри вулcano-гидротермальных систем. Важной особенностью является возможность формирования контрастных систем в пределах одной вулканической постройки.

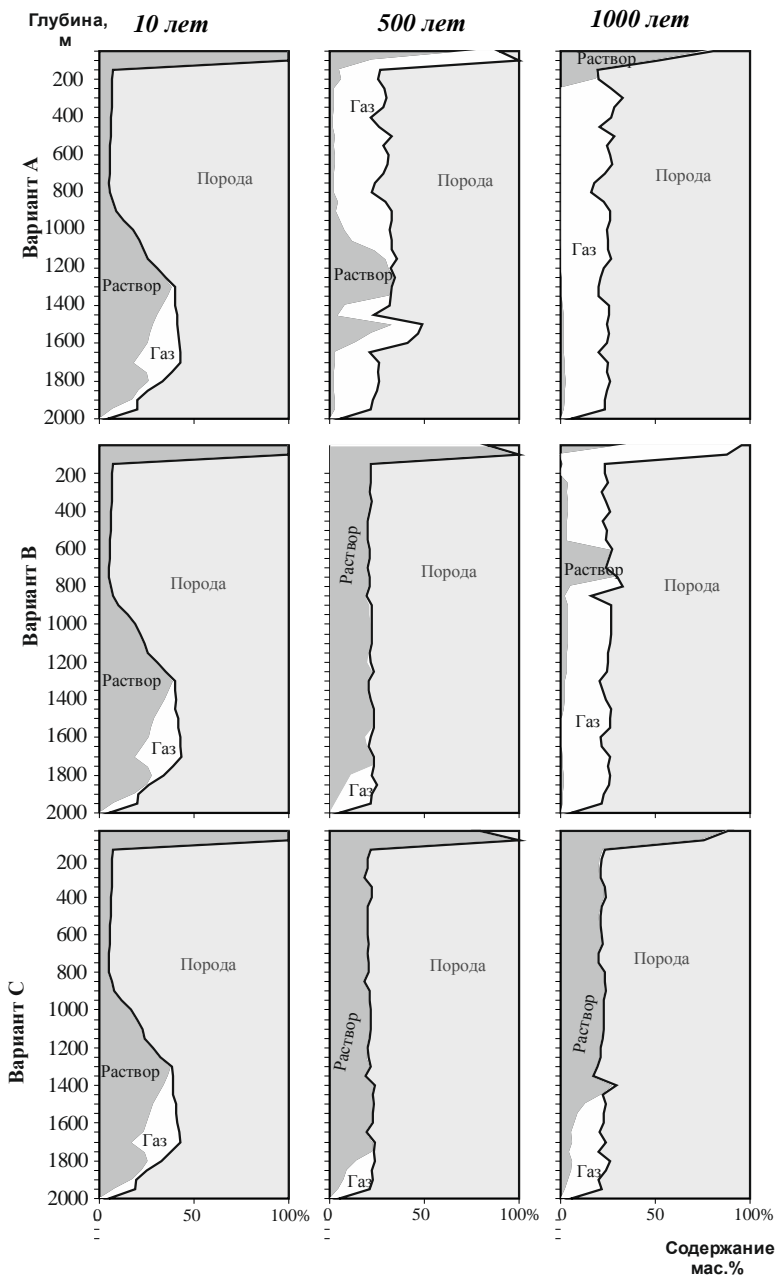


Рис. 13. Распределение фазового состава системы в зависимости от строения флюидопроводника (см. табл. 4) и возраста системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа направлена на исследование физико-химических параметров, состава и особенностей функционирования поверхностных разгрузок гидротермальных систем нескольких вулканов Курило-Камчатской островной дуги: Мутновского, Эбеко и Головнина. На основе фактических данных, собранных лично автором и при её участии, были сделаны предположения о генезисе гидротерм и источниках химических элементов в их составе. Термодинамическое моделирование, проведённое для типичных сценариев взаимодействия вода/порода в приложении к магматическому флюиду и вмещающим породам вулканической постройки, позволило объяснить процессы формирования контрастных типов термальных источников и количественно описать перераспределение химических элементов на пути подъёма флюида. С помощью геофизического исследования термальных полей получена геоэлектрическая зональность подповерхностного пространства, отражающая пути миграции и фазовых превращений гидротермальных растворов. В совокупности, результаты данной работы дали ответы на многие вопросы происхождения, трансформации и функционирования термальных проявлений на активных вулканах, но и поставили новые проблемы, решение которых будет осуществлено при будущих исследованиях.

Спектр физико-химических параметров обсуждаемых термальных источников изменяется по кислотности от ультракислых до слабощелочных вод, а по окислительно-восстановительному потенциалу от слабовосстановленных до сильноокисленных. Даже в пределах одной термальной площадки (Донное поле влк. Мутновский, Северо-Мутновское фумарольное поле, борта оз. Кипящее в кальдере Головнина) значения основных физико-химических параметров бывают крайне изменчивы.

Методами малоглубинной геофизики для обсуждаемых объектов выявлены четкие границы подповерхностных фазовых переходов. Пути миграции магматогенных флюидов и, как следствие, фазовые переходы в них определяют состав термальных растворов и фумарольных газов, которые фиксируются на поверхности термальных полей.

Таким образом, можно сформулировать вывод – генезис флюидов един, но пути миграции делают каждый термальный источник уникальным. Объяснение такого рода явлений следует искать в подповерхностных взаимодействиях флюид/порода и изменениях состава растворов на геохимических барьерах. Для численного описания возможности смены состава термальных растворов в ходе взаимодействия с породами флюидопроводника применялось физико-химическое моделирование.

Пути миграции магматогенных флюидов и, как следствие, фазовые переходы в них определяют состав термальных растворов и фумарольных газов, которые фиксируются на поверхности термальных полей. В зависимости от условий миграции магматогенного флюида, отсутствия или наличия флюидоупоров, в приповерхностном пространстве активных гидротермальных систем могут формироваться различные эпитермальные месторождения, связанные не с особенностями системы поставляющей флюид, а с фазовыми барьерами, встречающимися на его пути.

В работе оценено изменение химического и фазового состава флюида в зависимости от наличия или отсутствия флюидоупора в различных частях разреза. В основу теоретических построений положены фактические данные по петрофизическим свойствам пород, как свежих, так и гидротермально измененных. Важно подчеркнуть, что КАЖДАЯ разность вулканогенных пород имеет собственные характеристики пористости и проницаемости (не всегда находящиеся в очевидной зависимости), от которых зависят особенности потока флюида на разных этапах его эволюции. Вулканогенные породы, претерпевшие гидротермальные преобразования, обладают специфическим комплексом петрофизических свойств. Поэтому решение проблемы сопряженного описания динамики преобразований состава пород и их петрофизических характеристик при воздействии на них потоков магматогенных флюидов с меняющимся химическим и фазовым составом (магматический газ, гидротермальный раствор или паро-газовая смесь) позволило выявить множество особенностей перераспределения вещества в гидротермальной системе.

Благодарности. Автор работы искренне благодарна своим коллегам, без которых проведение представленного исследования было бы невозможно: Ельцову И.Н. и Панину Г.Л. (ИНГГ СО РАН), Жаркову Р.В. (ИМГ ДВО РАН), Котенко Т.А. и Котенко Л.В. (ИВиС ДВО РАН), Чудненко К.В. и Бычинскому В.А. (ИГХ СО РАН) Гаськовой О.Л., Гора М.П., Шарапову В.Н., Шевко А.Я. (ИГМ СО РАН). Большой вклад в работу внесло обсуждение и формирование результатов исследования с научным консультантом Шварцевым С.Л.. Особую благодарность автор хочет выразить своим родителям Бортниковой С.Б. и Бортникову П.Б. активно помогавшим в исследованиях и подготовке текста работы.

СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ (до 2014 года фамилия автора была *Бессонова*):

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Колонин Г.Р., Гаськова О.Л., **Бессонова Е.П.** Использование термодинамических констант реакций гидролитического растворения для оценки кислотно-основных свойств минералов // Зап. Всерос. минерал. о-ва, 2001, N 5, 9-20
2. Шарапов В.Н., **Бессонова Е.П.**, Черепанова В.К. Оценка возможных размеров и времени существования области надкритического флюида в субэаральных смешанных термальных системах андезитовых вулканов // Докл. РАН, 2004, 397, N 1, 97-100
3. **Бессонова Е.П.**, Фазлуллин С.М., Колонин Г.Р., Гаськова О.Л. Физико-химическое моделирование гидротермального изменения андезитов вулкана Эбеко, Курильские о-ва // Вулканология и сейсмология, 2004, N 4, 56-64
4. Бортникова С.Б., **Бессонова Е.П.**, Трофимова Л.Б., Котенко Т.А., Николаева И.В. Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о-п Парамушир) // Вулканология и сейсмология, 2006, N 1, 39-51
5. Бортникова С.Б., Шарапов В.Н., **Бессонова Е.П.** Гидрогеохимический состав источников фумарольного поля донного Мутновского вулкана (Южная Камчатка) и проблемы их связи с надкритическими магматическими флюидами // Докл. РАН, 2007, 413, N 4, 530-534
6. Бортникова С.Б. **Бессонова Е.П.** Колмогоров Ю.П. Элементы-примеси в самородной сере как индикатор источника вещества в фумарольных отложениях вулканических областей // Поверхность, 2007, № 12, С. 75-78
7. Шарапов В.Н., Черепанов А.Н., Черепанова В.К., **Бессонова Е.П.** К динамике фазовых барьеров во флюидных рудообразующих системах вулканических дуг // Геол. и геофиз., 2008, 49, № 11, С. 1098-1109
8. Бортникова С.Б. Гавриленко Г.М., **Бессонова Е.П.**, Лапухов А.С. Гидрогеохимия термальных источников в Мутновский (Южная Камчатка)// Вулканология и сейсмология, 2009, N 6, с. 26-43
9. **Бессонова Е.П.**, Шарапов В.Н., Чудненко К.В., Черепанова В.К. Новые возможности модели тепловой и физико-химической

динамики для описания вулканогенных эпitherмальных месторождений (на примере Асачинского месторождения, Камчатка) // Докл. РАН., 2010, Т. 431, № 4, с. 521–525

10. **Бессонова Е.П.**, Панин Г.Л. Горячая кровь Земли// Наука из первых рук, 2010, №35, с. 39-51

11. **Бессонова Е. П.**, Гора М. П., Шевко А. Я., Чудненко К. В., Черепанова В. К. Оценка динамики изменения физических характеристик гидротермально измененного разреза по данным неизотермического физико-химического моделирования (на примере в. Мутновский)// Физика земли, 2011, № 6, с. 57–68

12. **Bessonova E.P.**, Bortnikova S.B, Gora M.P., Manstein Yu.A., Shevko A.Ya., Panin G.L., Manstein A.K. Geochemical and Geoelectrical Study of Mud Pools at Mutnovsky Volcano (South Kamchatka, Russia): Behavior of Elements, Structure of Feeding Channels and the Model of Origin// Applied Geochemistry, 2012, volume 27, issue 9, pp. 1829-1843.

13. Shevko A.Ya., Gora M.P., Golikov N.A., Panin G.L., **Bessonova E.P.** Using petrophysical properties of volcanic rocks in the interpretation of geophysical data (volcano Ebeko, Kuril Islands)// Open Journal of Geology, 2013, 3, 77-80

14. Панин Г.Л., Гора М.П., Бортникова С.П., **Шевко Е.П.**, Подповерхностная структура северо-восточного fumarольного поля вулкана Эбеко (о. Парамушир) по данным геоэлектрических и геохимических исследований // Тихоокеанская геология, 2015, том 34, Т 4, стр. 67–78

15. **Shevko E.P.**, Bortnikova S.B., Abrosimova N.A., Kamenetsky V.S., Grakhova S.P., Zelenski M. Trace elements and minerals in fumarolic sulfur: the case of Ebeko volcano, Kuriles //GeoFluids 2017

Монографии:

1. Шарапов, В.Н., Борисенко А.С., Мазуров М.П., Перепечко Ю.В., Черепанов А.Н., **Бессонова Е.П.**, Павлова Г.Г. Модельный анализ развития континентальных мантийно-коровых рудообразующих систем//отв. ред. Поляков Г.В.; Рос. акад. наук, Сиб. Отд-ние; Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева, Мин-во образования и науки РФ, Федеральное агенство по образованию, Новосиб.Гос. ун-т. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2009

2. **Бессонова Е.П.**, Бортникова С.Б., Черепанова В.К. Физико-химическая модель газогидротермальной системы вулкана Эбеко,

Курило-Камчатская островная дуга, о-в Парамушир. LAP Lambert Academic Publishing GmbH @ Co.KG, 2012, 82 стр.

3. Бортникова С.Б., **Бессонова Е.П.**, Гора М.П., Шевко А.Я., Панин Г.Л., Жарков Р.В., Ельцов И.Н., Котенко Т.А., Бортникова С.П., Манштейн Ю.А., Котенко Л.В., Козлов Д.Н., Абросимова Н.А., Карин Ю.Г., Поспеева Е.В., Казанский А.Ю. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис// отв. ред. О.Л. Гаськова; А.К. Манштейн. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – 282 с.

Свидетельства о регистрации:

1. Гора М.П., Шевко А.Я., **Бессонова Е.П.**, Томиленко А.А. Вулканические породы острова Парамушир (Курильские острова)// База данных, номер государственной регистрации 2013620449, 28.03.2013.

2. **Шевко Е.П.**, Гора М.П., Шевко А.Я., Бортникова С.Б. Термальные источники вулкана Головнина (остров Кунашир, Курилы) // База данных, номер государственной регистрации 2015620436, 04.03.2015.

3. **Шевко Е.П.**, Гора М.П., Шевко А.Я., Бортникова С.Б. Термальные источники вулкана Менделеева (остров Кунашир, Курилы) // База данных, номер государственной регистрации 2015620437, 04.03.2015.