

*На правах рукописи*



**АБРОСИМОВА Наталья Александровна**

**ГЕОХИМИЯ ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
ВУЛКАНОВ ЭБЕКО И МУТНОВСКИЙ**

Специальность 25.00.09 – геохимия, геохимические методы  
поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Томск - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук

**Научный руководитель:** доктор геолого-минералогических наук, профессор **Бортникова Светлана Борисовна**

**Официальные оппоненты: Аношин Геннадий Никитович,**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, главный научный сотрудник


**Плюснин Алексей Максимович,**  
доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Геологический институт СО РАН, заместитель директора по научной работе

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

Защита диссертации состоится 22 апреля 2013 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета ДМ212.269.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, 20-й корпус ТПУ, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, г. Томск, ул. Белинского, 55).

Автореферат разослан 21 марта 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат геолого-минералогических наук  **Лепокурова Олеся Евгеньевна**

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Перенос химических элементов газогидротермальными потоками и взаимодействие таких потоков с породами широко обсуждается в геохимической литературе (Шварцев и др., 2005; Evans et al., 2008). Взаимодействия вода-порода-газ играют важную роль в функционировании гидротермально-магматических систем (Рычагов и др., 2002; Evans et al., 2008). Данные о составе газовых потоков и растворов могут быть использованы для прогнозирования и мониторинга вулканической активности (Symonds et al., 1987; Hinsberg et al., 2010). Газогидротермы играют важную роль в формировании рудных отложений, осуществляя перенос значительной части химических элементов и их соединений из магматической конвективной ячейки в гидротермальную (Набоко, 1980; Symonds et al., 1987; Hedenquist and Lowenstern 1994; Рычагов и др., 2002). Модели строения и функционирования вулcano-гидротермальных систем базируются на геохимических данных о составе горячих источников, серных фумарол и кипящих котлов, которые являются «окном» в магматическую систему (Hedenquist and Lowenstern, 1994; Бессонова, 2004; Hinsberg et al., 2010).

Состав газогидротермальных растворов в областях активного вулканизма характеризуется широкими вариациями как в содержании основных породообразующих элементов (Al, Fe, Ca, Mg, Na, K), так и в содержании микроэлементов. Это проявляется на примере многих вулканических центров, демонстрирующих спектр составов вод от ультракислых до карбонат содержащих. Наблюдаемые вариации в элементном составе растворов указывают как на гомогенность/гетерогенность источников формирования этих растворов, так и на последующую эволюцию производных магматического флюида.

Несмотря на большой объем существующих данных о поведении химических элементов в газовых и водных потоках, остаются малоизученными вопросы о формах миграции и источниках химических элементов. С развитием аналитических методов появляются новые возможности определения широкого круга элементов в вулканических продуктах, а с развитием геофизических методов появляются новые инструменты исследования подповерхностного пространства.

**Целью работы является** количественное описание геохимии процессов миграции химических элементов в водных и газовых потоках на активных вулканах.

### **Основные задачи исследования.**

1. Определить гидрохимические параметры термальных растворов в поверхностных разгрузках и состав конденсатов парогазовой смеси серных фумарол.

2. Определить химический состав вмещающих вулканогенных пород (различной степени измененности), гидротермальных новообразований (современные минералы термальных площадок, донные осадки кипящих котлов, самородная сера).

3. Описать поведение химических элементов в процессе взаимодействия термальных растворов и газовых потоков с вмещающими породами вулканической постройки вулканов.

4. На основе результатов геофизических измерений и геохимических параметров изучаемой системы построить модель, описывающую процесс миграции химических элементов в близповерхностном пространстве вулcano-гидротермальной системы.

**Объектами исследования** были выбраны два активных вулкана Мутновский и Эбеко, расположенных в пределах Курило-Камчатской островной дуги. На этих вулканах проявляется активная деятельность с мощными фумарольными полями, в пределах которых непрерывно функционируют серные фумаролы, паровые струи, термальные источники и грязевые котлы. Растворы термальных источников и конденсатов вулканов Эбеко и Мутновский по своему химическому составу отличаются от аналогичных термопроявлений на других известных активных вулканах мира.

**Фактический материал.** В основу диссертационной работы положен фактический материал, собранный в результате полевых геолого-геохимических и геофизических исследований 2001-2012 гг. на вулканах Эбеко и Мутновский с активным участием автора в последние годы. Основная часть коллекции образцов вмещающих пород вулканов Эбеко и Мутновский предоставлена А.Я. Шевко, М.П. Гора, Е.П. Бессоновой (ИГМ СО РАН). В ходе работ отобрано и проанализировано 154 образца твердого вещества (вмещающие породы, самородная сера, выцветы, донные осадки термальных источников и котлов) на широкий спектр элементов и 70 образцов вмещающих пород на содержание основных породообразующих окислов. Отобрано и проанализировано 94 пробы растворов (растворы гидротерм вулканов, водные вытяжки из самородной серы, паровые воды из вещества термальных площадок и серных фумарол, конденсаты парогазовой смеси серных фумарол) на широкий спектр элементов. По результатам анализов проведена

математическая обработка и получены статистические параметры для выявления генетических связей элементов.

**Методы исследования** включают в себя сбор фактического материала (термальные растворы, донные осадки, выцветы термальных площадок, самородная сера и конденсаты парогазовой смеси серных фумарол, вулканыты различной степени измененности), анализ образцов на общий химический состав (потенциометрические, колориметрические и титриметрические методы), элементный состав (ИСП-АЭС, ИСП-МС, РФА, РФА-СИ) и минеральный состав (рентгенофазовый анализ, электронно-сканирующая микроскопия), петрографическое изучение пород, расчет химических форм нахождения элементов в растворах при помощи программы и базы данных WATEQ4F, исследование строения подводящих каналов на фумарольных полях изучаемых вулканов методами вертикального электрического зондирования и электротомографии.

**Научная новизна работы.** Впервые для вулканов Эбеко и Мутновский:

1. в газогидротермах установлены аномально высокие концентрации  $\text{Sr}$  и  $\text{Ni}$ ;

2. оценена сравнительная подвижность химических элементов в процессе взаимодействия «вода-порода» на основе особенностей их распределения между растворами и вмещающими породами;

3. в самородной сере определен широкий круг химических элементов и минеральный состав ее включений;

4. показана возможность переноса  $\text{Sb}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$  в газовой фазе.

**Практическая значимость работы.** Выявленные закономерности распределения элементов в приповерхностных частях вулканогидротермальных систем могут быть использованы для установления источника рудного вещества при изучении процессов рудообразования. На основе геохимии газогидротермальных источников построена модель, которая объясняет происхождение составов поверхностных разгрузок фумарольных полей.

**Личный вклад автора** состоит в отборе большинства проб, проведении полевых и лабораторных измерений, подготовке проб для анализа, интерпретации полученных данных.

**Апробация работы и публикации.** Результаты работы доложены на Всемирном геотермальном конгрессе (Индонезия, 2010), XII Международном симпозиуме «Water-Rock Interaction - 13» (Мексика,

2010), Международной геохимической конференции Goldschmidt (Чехия, 2011), Всероссийской конференции «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» (Томск, 2012).

По теме диссертации соискателем опубликовано 2 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК, 1 монография и 5 статей в материалах конференций.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем работы составляет 143 страниц, включая 39 таблиц и 50 рисунков. Список литературы включает 108 наименований.

**Благодарности.** Выражаю большую благодарность научному руководителю профессору, д.г.-м.н. Светлане Борисовне Бортниковой за постоянную помощь в работе, полезные советы и поддержку на протяжении всех этапов исследования. Благодарю зав. лабораторией № 801 ИНГГ СО РАН чл.-корр. РАН В.А. Верниковского и сотрудников лаборатории, в которой начиналось исследование. За ценные рекомендации автор признателен д.г.-м.н. О.Л. Гаськовой, д.г.-м.н. А.Е. Верниковской, к.г.-м.н. Д.А. Новичу. Автор благодарит Е.П. Бессонову, А.Я. Шевко, М.П. Гора, У.Н. Куринную за предоставленный каменный материал, без которого данная работа была бы невозможна. Благодарю С.П. Бортникову, Т.А. Котенко и Л.В. Котенко за помощь при проведении полевых работ и за предоставление фотоматериалов. Благодарю Г.Л. Панина, Ю.Г. Карина, В.А. Белобородова, Ю.А. Манштейна за предоставление результатов геофизического исследования термальных полей. Выражаю искреннюю благодарность О.П. Сасовой за помощь при анализе водных растворов, а также А.В. Еделеву, Н.В. Юркевич, Т.В. Корнеевой, А.Ю. Девятовой за ценные советы при обсуждении результатов исследования. Анализ проб был проведен при участии сотрудников ИГМ СО РАН: Ю.П. Колмогорова, к.х.н. И.В. Николаевой, к.г.-м.н. Н.А. Пальчик.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*В первой главе* проведен анализ литературных данных о составе газогидротерм в вулканических регионах мира. Указаны факторы, от которых зависит состав вулканических газов и термальных растворов. Приводятся данные о возможных источниках химических элементов и их формах переноса в газовых и водных потоках. *Во второй главе* рассмотрены основные черты геологического строения вулканов Эбеко и Мутновский с подробным описанием изучаемых на них фумарольных полей. *Третья глава* освещает методологию исследования. *В четвертой главе* изложены результаты изучения состава парогазовой смеси серных

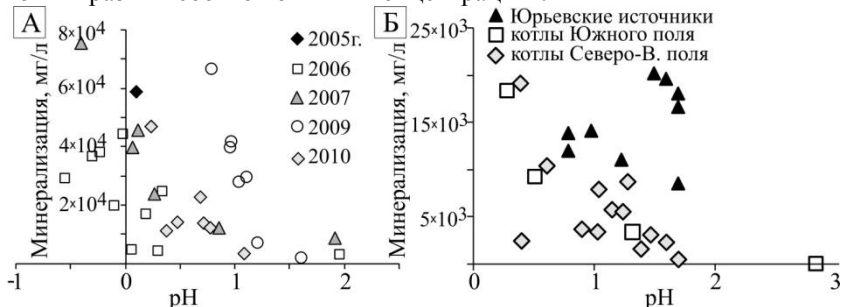
фумарол и самородной серы вулканов Эбеко и Мутновский. *Пятая глава* посвящена геохимии растворов термальных источников на Донном фумарольном поле влк. Мутновский и фумарольных полях влк. Эбеко. Рассматриваются механизмы, регулирующие состав поверхностных разгрузок, и возможные причины появления контрастных составов термальных источников на фумарольных полях. *Шестая глава* посвящена геохимии процесса гидротермально-метасоматического изменения вмещающих пород на изучаемых вулканах.

### ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

**Положение 1.** Термальные источники, расположенные на ограниченной территории в пределах фумарольных полей вулкана Эбеко и фумарольного поля Донного вулкана Мутновский, имеют контрастный химический состав и физико-химические параметры. Вариации состава и параметров растворов источников определяются различными соотношениями «флюид/метеорные воды», «флюид/порода», «флюид/газ».

Термальные растворы изучаемых вулканов относятся к высокоминерализованным кислым и ультра-кислым водам с высоким окислительно-восстановительным потенциалом. Общая минерализация растворов обратно пропорциональна значениям pH как для источников влк. Мутновский (рис. 1А), так и для влк. Эбеко (рис. 1Б).

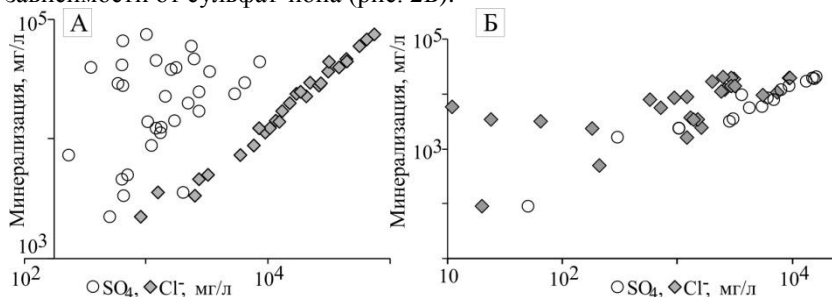
В анионном составе растворов преобладают хлорид- и сульфат-ионы в разных соотношениях и концентрациях.



**Рис. 1.** Зависимость общей минерализации термальных растворов вулканов Мутновский (А) и Эбеко (Б) от их кислотности.

Для термальных растворов влк. Мутновский общая минерализация прямо пропорциональна концентрации хлорид-иона (рис. 2А), а для

растворов источников влк. Эбеко минерализация находится в прямой зависимости от сульфат-иона (рис. 2Б).



**Рис. 2.** Зависимость общей минерализации растворов от содержания основных анионов для вулканов Мутновский (А) и Эбеко (Б).

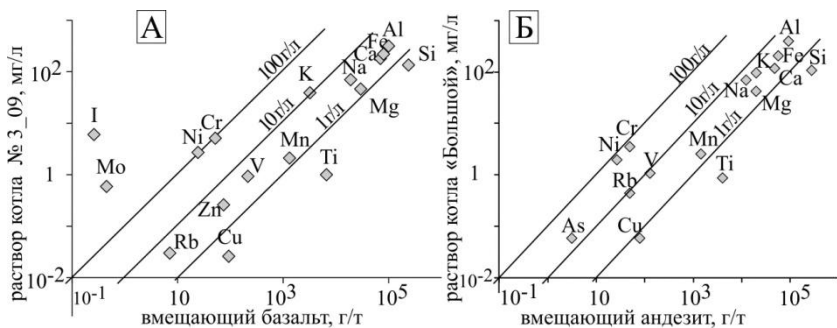
Кроме сульфат- и хлорид-ионов, в анионном составе растворов Донного fumarольного поля были определены фторид-, фосфат- и нитрат- ионы (мг/л): до 115, 120, 960, соответственно. Анионный состав свидетельствует о том, что растворы котлов представляют собой смесь различных кислот: главным образом, соляной и серной со значительным количеством азотной, плавиковой, ортофосфорной.

Основным катионом в растворах термальных источников является алюминий, доля которого (мг-экв%) среди катионов составляет до 68% в растворах влк. Эбеко и до 90% в растворах Донного fumarольного поля. Следующим по долевному содержанию в растворах большинства источников является железо. Однако в котле на Южном поле, в большинстве Юрьевских источников влк. Эбеко и в нескольких котлах влк. Мутновский - кальций. Щелочные и щелочноземельные металлы (К, Na, Mg), которые обычно являются основными катионами в природных водах, составляют меньшую долю в большинстве растворов газогидротерм, не превышающую в сумме 13%. В некоторых котлах Донного fumarольного поля вторым катионом по долевному содержанию является К.

Для объяснения контрастных составов источников содержание элементов в растворах было сопоставлено с их содержанием в неизмененных вмещающих породах (рис. 3).

Концентрации основных и примесных породообразующих элементов Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg, Ti, Mn, Rb и металлов V, Cu, Zn в литре раствора соответствуют полному растворению от 0.1 до 10 гг. вмещающей породы.



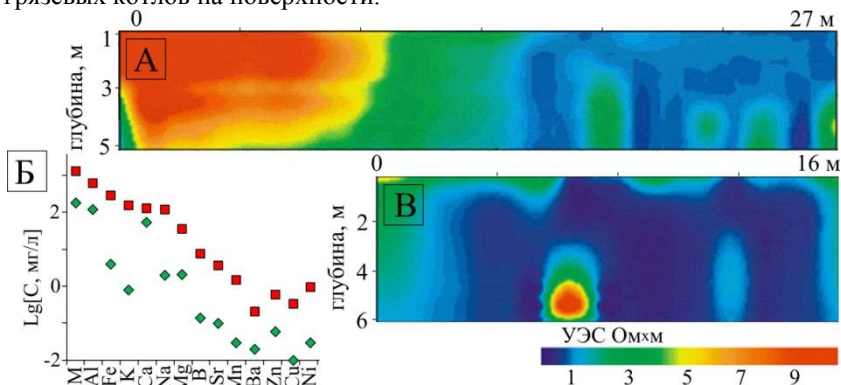


**Рис. 3.** Диаграммы концентраций элементов в растворах котла № 3\_09 влк. Мутновский (А) и котла «Большой» влк. Эбеко (Б) в сравнении с содержанием во вмещающем базальте и андезите, соответственно.

Вмещающие породы изучаемых вулканов являются основным источником для большинства порообразующих элементов (Mg, Ca, Si, Al, Fe, Na, K, Ti) в растворах. Отличия в содержании порообразующих элементов в составе растворов разных, но близко расположенных, котлов хорошо объясняются различными соотношениями вода/порода при взаимодействии поднимающегося флюида с вулканическими породами.

Следующим важным фактором, влияющим на спектр и уровень содержания химических элементов в растворах, является соотношение поступающих с магматическими флюидами растворов и метеорных вод. Влияние этого фактора подтверждается составом растворов грязевых котлов на Донном fumarольном поле. Было установлено, что растворы котлов в 2007 году содержали меньшую долю магматического флюида, чем растворы 2009 года. Об этом свидетельствуют концентрации большинства химических элементов и общая минерализация, которые в 2009 году были существенно выше, чем в 2007 г. (рис. 4Б). Сравнение результатов электромагнитного индукционного частотного зондирования (ЧЗ), проведенного сотрудниками лаборатории № 564 ИНГГ СО РАН, на одной и той же площадке на Донном fumarольном поле, но в разные годы, подтвердило влияние метеорных вод на состав растворов котлов. На полученных профилях ЧЗ были выявлены меняющиеся от года к году конфигурации каналов. После снежной зимы в 2007 г. образовавшийся на склонах Донного fumarольного поля снежник интенсивно таял, насыщая пресной метеорной водой поднимающиеся с глубины растворы, тем самым уменьшая

минерализацию и концентрацию химических элементов в растворах грязевых котлов на поверхности.



**Рис. 4.** Профили частотного зондирования площадки на Донном фумарольном поле в 2007 г. (А) и 2009 г. (В) и сравнение состава растворов грязевого котла №6 в 2007 г. (зеленый ромб) и в 2009 г. (красный квадрат) (Б).

На профиле ЧЗ, сделанном в 2007 году (рис. 4А), выявлены более тонкие вертикальные каналы, соответствующие зонам высокоминерализованного флюида. Форма питающих каналов была как бы «размытой», хотя их вертикальное строение четко обозначилось на разрезах. В 2009 году после относительно малоснежной зимы и сухого лета снежники отсутствовали на склонах, соответственно, соотношение «магматический флюид/метеорные воды» сдвинулось в пользу глубинных компонентов в растворах, это нашло свое отражение в изменении гидрохимической зональности подповерхностного пространства. Отчетливо видно, что в 2009 г. подповерхностное пространство под котлами представляло собой единую высокоминерализованную среду, а между выходами котлов образовались сравнительно непроводящие, «сухие» участки (рис. 4В).

Сравнением максимальных концентраций химических элементов в растворах котлов влк. Мутновский с растворами котлов на влк. Эбеко и термальными источниками р. Юрьева установлено, что концентрации практически всех элементов максимальны в растворах влк. Мутновский (рис. 5).

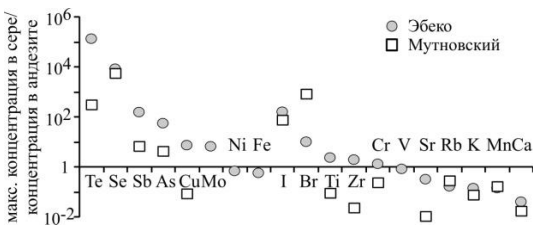
Для гидротерм влк. Эбеко содержание большинства породообразующих элементов выше в растворах Юрьевских источников. Однако же содержание такой ассоциации элементов, как Cr-Ni-Ti выше в растворах котлов фумарольных полей влк. Эбеко.



**Рис. 5.** Максимальные концентрации элементов в термальных растворах вулканов Эбеко и Мутновский.

Присутствие летучих элементов As, Sb, B в составе источников может объясняться поступлением их из газовой фазы. Для растворов влк. Мутновский с ультракислыми значениями pH и высоким содержанием большинства элементов по сравнению с растворами влк. Эбеко значение газовой фазы в составе растворов выше.

Способность химических элементов переноситься в газовой фазе на изучаемых вулканах подтверждается составом самородной серы, в котором определен широкий спектр химических элементов. При сопоставлении состава серы с составом вмещающих пород элементы были разделены на две группы (рис. 6).



**Рис. 6.** Сравнение содержания химических элементов в самородной сере и вмещающих андезитах.

Первую группу составляют элементы, содержание которых выше в сере, чем в андезитах, а вторую группу – элементы в более высоких концентрациях в андезитах. Проведенное исследование минеральных включений в самородной сере и статистическая обработка полученных результатов состава самородной серы позволяют предположить, что элементы первой группы способны переноситься в газовой фазе, а второй – в виде аэрозолей вмещающих пород.

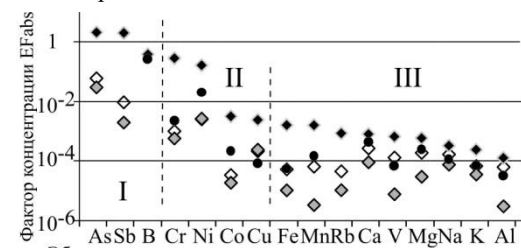
Роль вулканического газа в составе растворов подтверждается и составом конденсатов парогазовой смеси серных фумарол, в которых определен широкий спектр химических элементов. Чтобы выделить

элементы, способные переноситься в газовой фазе, для конденсатов был вычислен фактор концентрации  $EF$  (Enrichment Factor).

$$EF = \frac{(E_i/R)_x}{(E_i/R)_r} \quad (1),$$

где  $x$  обозначает исследуемое вещество,  $E_i$  – содержание элемента,  $R$  – содержание нормировочного элемента (Symonds et al., 1987).

Для оценки конденсатов вулканов Эбеко и Мутновский был вычислен ненормированный фактор концентрации  $EF_{abs}$  (Зеленский, 2003). На рисунке 7 приведены абсолютные значения фактора концентрации элементов в конденсатах.



**Рис. 7.** Факторы концентрации элементов в конденсатах  $EF_{abs}$ .

♦ влк. Эбеко  
 ◇ pH=4.16-4.37 (n=2) ◆ pH=1.44-1.54 (n=3) ● pH=0.09-0.78 (n=5)  
 влк. Мутновский  
 ● pH=0.8 (n=1)

Элементы расположены в порядке уменьшения  $EF_{abs}$  для конденсатов Эбеко в фиксированных интервалах кислотности. В первую группу входят наиболее летучие неметаллы As, Sb, B. Во вторую группу входят металлы Cr, Ni, Co, Cu, образующие летучие соединения. Никель и хром способны переноситься в газовой фазе в виде хлоридов никеля ( $NiCl_2$ ) и оксихлоридов хрома ( $CrO_2Cl_2$ , Symonds et al., 1991). В группу III отнесены породообразующие элементы (Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K, Al), а также Rb и V. По-видимому, большая часть элементов из этой группы попадает в конденсаты из вмещающих пород. При смешении с такими конденсатами термальные растворы могут обогащаться различными элементами.

**Положение 2.** Газогидротермальные источники вулканов Мутновский и Эбеко характеризуются высоким содержанием Cr и Ni по сравнению с подобными проявлениями на других вулканах мира. Обнаруженные факты обусловлены структурными особенностями проводящих каналов, механизмами миграции флюидов и наличием дополнительного источника в недрах изучаемых вулканов.

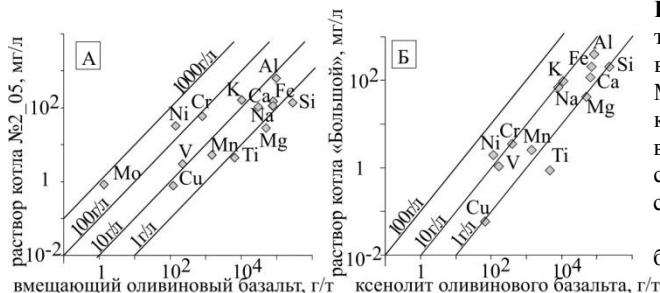
Максимальные концентрации хрома равные 60 мг/л в растворах котла № 2 на Донном fumarольном поле влк. Мутновский и 16 мг/л в конденсат парогазовой смеси серных fumarол влк. Эбеко в ассоциации с очень высокими концентрациями Ni, достигающими 33 мг/л в растворах того же котла и 12 мг/л в конденсатах fumarол влк. Эбеко, превышают на порядок известные максимальные концентрации этих элементов в вулканических газогидротермах мира (рис. 8).



**Рис. 8.** Максимальные концентрации некоторых химических элементов в растворах газогидротермальных источников (А) и конденсатах парогазовой смеси серных fumarол (Б) в различных вулканических регионах.

Для объяснения составов растворов были детально изучены породы, слагающие постройки вулканов Эбеко и Мутновский. Постройки изучаемых вулканов сложены преимущественно андезитами, андезибазальтами и базальтами. Однако в фундаменте влк. Мутновский и в ксенолитах влк. Эбеко были обнаружены оливиновые базальты неописанные ранее (Гора и др., 2009).

Концентрации Si, Fe, Ti, Mn, Mg, Na, Ba, Cu, Co в термальных растворах соответствует полному растворению от 1 г до 10 г оливинового базальта в 1 л раствора (рис. 9). Однако содержание ассоциации элементов Ni-Cr в растворах вулканов Мутновский и Эбеко не могут быть объяснены извлечением этих элементов даже из оливиновых базальтов.



**Рис. 9.** Концентрация элементов в котле № 2 влк. Мутновский (А) и котле «Большой» влк. Эбеко (Б) в сравнении с содержанием в оливиновых базальтах.

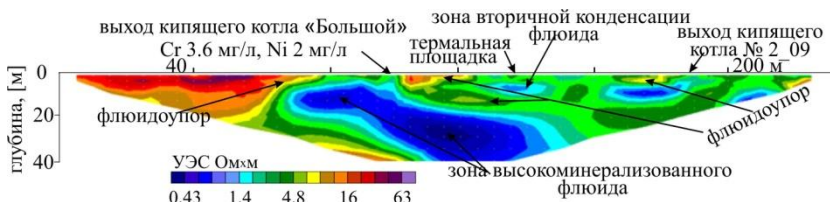
Очевидно, для объяснения обнаруженных фактов необходимо привлечь механизм, способный привести к появлению минерализованных растворов с высоким содержанием химических элементов. Концентрирование элементов может осуществляться на геохимических барьерах (например, при декомпрессионном вскипании сконденсированных растворов под флюидоупором), где происходит фазовое разделение растворов на парогазовую смесь, уходящую в виде газовых струй в fumarольных постройках или парения на термальных площадках, и остаточный рассол. Действие такого барьера можно непосредственно наблюдать в приповерхностных условиях на примере системы «поровые растворы fumarольных построек - конденсаты». В остающихся после разделения на фазы поровых растворах концентрации практически всех элементов возрастают на один-два порядка по сравнению с уходящим газом (конденсатом, табл. 1).

Таблица 1. Состав конденсата и порового раствора серной fumarолы на Донном fumarольном поле влк. Мутновский.

	Si	Ca	Mg	K	Na	Fe	Al	Mn	Ti
конденсат	2	19	3.2	1.1	3.3	3.3	2.8	0.17	0.008
пор. раствор	18	220	110	80	110	310	490	5.3	5.7
	Zn	Cu	Pb	V	Co	Cr	Ni	As	B
конденсат	1.1	0.006	0.052	0.01	0.006	0.04	0.29	0.16	12
пор. раствор	2.4	0.85	0.3	1.4	0.12	0.19	0.11	26	330

Даже такие подвижные анионогенные элементы, как As и Sb не уходят с газовой фазой, а преимущественно остаются в поровом растворе (концентрация Sb в конденсате ниже предела обнаружения). Допуская, что многочисленные флюидоупоры располагаются в разных частях разреза, и флюид на пути движения способен многократно фракционировать, можно уверенно предположить, что механизм фазового разделения приведет к появлению тех концентраций элементов, которые были определены в растворах котлов и конденсатов. Следовательно, именно фазовое разделение флюида, даже более чем взаимодействие с вмещающими породами, является тем ключевым механизмом, который регулирует состав конечных гидротермальных разгрузок - кипящих котлов, термальных источников, серных fumarол.

Последовательную смену фазового состава флюида можно проследить на одном из пяти профилей, полученных методом электротомографии сотрудниками лаборатории № 564 ИНГГ СО РАН при участии автора на Северо-Восточном поле, где идет основная гидротермальная разгрузка вулканической деятельности влк. Эбеко (рис. 10).



**Рис. 10.** Строение подповерхностного пространства Северо-Восточного фумарольного поля, установленное методом электротомографии.

Изменение удельного электрического сопротивления (УЭС) среды, выявленное до глубины 40 м, можно интерпретировать как отражение уровня минерализации раствора и трансформацию его фазового состава. Геоэлектрическая зональность подповерхностного пространства показывает наличие зоны с низким удельным сопротивлением, что дает нам право отнести ее к резервуару высокоминерализованного флюида. Ближе к поверхности флюид из высокоминерализованного резервуара претерпевает изменения по описанному выше механизму, из-за наличия на его пути подъема флюидоупора, в результате чего на поверхности выходит котел «Большой» с кипящим ( $T=98^{\circ}\text{C}$ ) минерализованным (4.7 г/л) раствором, содержащим высокие концентрации Ni и Sr. На линии профиля через 40 м от котла «Большой» расположены зоны с теми же геоэлектрическими параметрами, что и для выхода котла, но на поверхности происходит выход парогазовой фазы в виде фумарол и парящих прогретых площадок. Что является результатом вторичной конденсации, но уже не минерализованного флюида, как в случае с котлом «Большой», а отделившейся от оставшегося рассола парогазовой фазы.

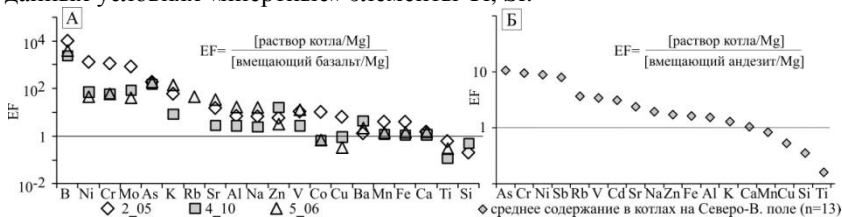
**Положение 3.** На термальных полях вулканов Эбеко и Мутновский широко распространены в разной степени измененные вмещающие породы, гидротермальные новообразования. Основываясь на подвижности элементов и их распределении в различных типах твердого вещества, выделены следующие группы элементов: 1) наиболее подвижные аниогенные элементы: As, Sb, Se, I, B, Mo и некоторые металлы Ni, Cr, V; 2) подвижные элементы Al, Ca, K, Na, Rb, накопление которых в растворе идет при многократной переработке вмещающих пород; 3) инертные элементы Ti, Si.

Была сделана оценка подвижности элементов при гидротермальном изменении пород (сернокислотном выщелачивании) на основании вычисления фактора концентрации ( $EF$ ) согласно

формуле (1). Фактор концентрации применялся для вычисления относительной подвижности химических элементов при взаимодействии вулканических гидротерм с вмещающими породами (Taran et al., 1995, 2008, Aіurra et al., 2000). За нормировочный элемент принимается Mg вследствие его низкой подвижности при выщелачивании из пород в высокотемпературных процессах.

Элементы, расположенные в порядке уменьшения нормированного по магнию фактора концентрации  $EF$  (рис. 11), делятся на три группы.

Элементы, которые могут быть названы подвижными при взаимодействии вмещающих пород и растворов данного состава, составляют первую группу. Это анионогены (As, Sb, В, Мо), примесные металлы (Cr, Ni, Zn, V) и породообразующие элементы (Al, Na, K, Rb, Sr). Для В, As, Sb, Мо, Ni и Cr фактор концентрации намного превышает единицу. Большой список элементов - Co, Cu, Ba, Mn, Fe, Ca находится в количестве, поставляемом породой при конгруэнтном ее растворении, - это вторая группа. Третью группу составляют наименее подвижные в данных условиях «инертные» элементы Ti, Si.



**Рис. 11.** Факторы концентрации химических элементов в растворах грязевых котлов вулканов Мутновский (А) и Эбеко (Б), нормированные по магнию.

Для составов котлов на изучаемых вулканах были выделены ассоциации химических элементов. Для Северо-Восточного поля: Al-Rb-Li-Be, Fe-Mn-V-Zn, Ba-Sr-K-Ca, Co-Cr-Ni-Ti. Для Юрьевских источников характерна ассоциация, типичная для слюдизированных пород: Li-Sr-Be. На Донном фумарольном поле это три типоморфные ассоциации: Co-Ni-Fe-Cr-Ti; Ba-Sr-Zn; Al-Li-Be-Rb. Наличие в растворах изучаемых вулканов мультиэлементных аномалий элементов указывает на поступление их в раствор не из свежих пород, а из вторичных ореолов, сформированных предшествующим метасоматозом. В многоступенчатом гидротермальном изменении пород неоднократно происходили процессы растворения породной матрицы, рассеяния и концентрирования элементов.



При сравнении концентраций элементов во вмещающих андезитах и трех типах поверхностных новообразований вулкана Эбеко: самородной сере, новообразованных минералах на термальных площадках (выцветы) и осадках из кипящих котлов были получены следующие закономерности. Аниогенные элементы As, Sb, Se, I, Br, а также Cu образуют наиболее высокие концентрации в сере по сравнению с андезитами. Элементы Zr, Ag, Cd, Sn также повышены в сере, но в меньшей степени. Хром, V и Rb легко переносятся в водных растворах и накапливаются в осадках кипящих котлов в существенно большей концентрации, чем в выцветах и сере. Новообразованные минералы термальных площадок, формирующиеся из паровой фазы, содержат сравнительно низкие концентрации обсуждаемых элементов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное комплексное геолого-геохимическое и геофизическое исследование фумарольных полей вулканов Эбеко и Мутновский установило большое разнообразие составов термальных растворов как по физико-химическим условиям, так и по концентрациям макро- и микрокомпонентов и позволило объяснить их происхождение (рис. 12).

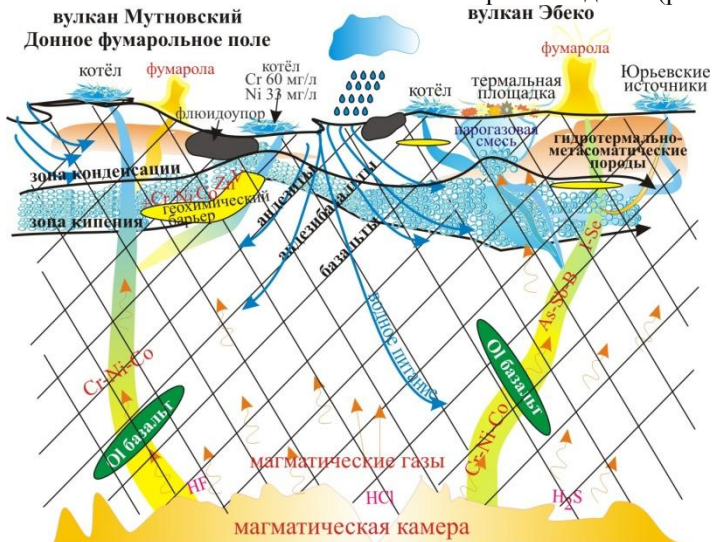


Рис. 12. Модель функционирования приповерхностной части гидротермально-магматической системы.

Газогидротермы, разгружающиеся на термальных полях изучаемых вулканов, имеют схожий глубинный источник, на что указывает ассоциация элементов Cr-Ni, определенная в аномальных количествах в растворах котлов Донного фумарольного поля влк. Мутновский и в конденсатах парогазовой смеси серных фумарол влк. Эбеко.

Основным источником химических элементов в растворах являются вмещающие породы. Однако проведенный анализ взаимодействия «вода-порода» показал, что уровень концентрации Cr, Ni, В, Мо, As, Sb в растворах гидротерм не может быть объяснен только лишь их выщелачиванием из вмещающих пород. Для достижения обнаруженных концентраций перечисленных элементов в газогидротермах на фумарольных полях изучаемых вулканов необходим дополнительный источник, поставляющий их в магматический флюид, а затем - в зоны поверхностных гидротермальных разгрузок, и механизм, способный привести к появлению минерализованных растворов с высоким содержанием указанных элементов. Концентрирование элементов может осуществляться на геохимических барьерах. Если через такой барьер проходит подводящий канал, питающий поверхностные разгрузки на фумарольных полях вулканов, то в растворах грязевых котлов на Донном фумарольном поле могут быть достигнуты искомые концентрации химических элементов. В том случае, когда имеются подводящие каналы, способные транспортировать элементы в газовой фазе, на фумарольных полях появляются серные фумаролы с высоким содержанием металлов - серные фумаролы влк. Эбеко.

Мышьяк, Sb, Se, I, В и Мо поступают в поверхностные разгрузки из магматических газов. Хром и никель поступают из глубинного источника, возможно, что в постройке изучаемых вулканов существуют не идентифицированные пока тела (или магматические камеры) гипербазитового состава. Повышенное содержание К, Al, Rb, Са и Na в растворах достигается из-за многократной переработки вмещающих пород, что характерно для котлов на Северо-Восточном фумарольном поле, Юрьевских источников и некоторых котлов на Донном фумарольном поле. Источником химических элементов в новообразованных минералах термальных площадок, содержащих наименьшие концентрации химических элементов в сравнении с другим твердым веществом, является парогазовая фаза, отделяющаяся при кипении флюида.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Абросимова Н.А.**, Бортникова С.Б. Исследование с использованием метода РФА-СИ поведения элементов при гидротермально-метасоматическом изменении вмещающих пород влк. Мутновского // Известия РАН. Серия физическая. - 2013. - Т 77. - № 2. - С. 233-235 (Перечень ВАК).
2. **Abrosimova N.A.**, Bortnikova S.B. Sources of chemical elements in fumarols of active volcanic regions (Ebeco volcano, Paramushir Island) // Mineralogical Magazine. - 2011. - V. 75. - № 3. - P. 405.
3. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., **Присекина Н.А. (Абросимова Н.А.)** Геохимическая оценка потенциальной опасности отвальных пород Ведугинского месторождения // Геохимия. - 2010. - № 3. - С. 295-310 (Перечень ВАК).
4. **Абросимова Н.А.**, С.Б. Бортникова, О.Л. Гаськова. Формы миграции химических элементов в дренажных потоках из-под отвальных пород Ведугинского месторождения золота (Красноярский край). - Publishing house: LAP LAMBERT Academic Publishing. - 2012. - 72 с.
5. **Prisekina N.A. (Abrosimova N.A.)**, Bortnikova S.B. The mineral modes of potentially toxic elements in the rocks of Veduginskoe deposits // 13th International Symposium on Water-Rock Interaction. - London: CRC Press, 2010. - P. 539-542.
6. Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Bessonov D.Yu., Kolmogorov Yu.P., Lapuchov A.S., Palchik N.A., **Prisekina N.A. (Abrosimova N.A.)**, Kotenko T.A. Trace elements in native sulfur as indicator of substance sources in fumaroles of active volcanic regions (Ebeko volcano, Paramushir island) [Электронный ресурс] // Proceedings World Geothermal Congress 2010. 25-29 April 2010. - Bali, 2010. – 10 p. (CD-ROM).
7. **Абросимова Н.А.** Поведение химических элементов в процессе взаимодействия Верхне-Юрьевских термальных источников с вмещающими породами (в. Эбеко, о. Парамушир) // Труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Томск, 1-5 октября 2012 г. - Томск: Изд-во НТЛ, 2012. - С. 293-295.
8. Бортникова С.Б., **Абросимова Н.А.**, Бессонова Е.П. Геохимия выщелачивания элементов из базальтов при формировании грязевых котлов на Северо-Мутновском фумарольном поле // Труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Томск, 1-5 октября 2012 г. - Томск: Изд-во НТЛ, 2012. - С. 203-206.