

МЕТАЛЛОНОСНОСТЬ ТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ АКТИВНЫХ ВУЛКАНОВ КАК ОТРАЖЕНИЕ ИХ ГЕНЕЗИСА (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА, ПАРАМУШИР, РОССИЯ)

С.Б. Бортникова¹, Е.П. Бессонова³, Г.М. Гавриленко², С.П. Бортникова¹,
Ю.А. Манштейн¹, А.К. Манштейн¹, А.В. Кирюхин², А.А. Кузьмина², Т.А. Котенко²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск,
e-mail: bortnikovasb@ipgg.nsc.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
e-mail: karpovga@ksnet.ru

³ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева, Новосибирск, e-mail: liza@uiggm.nsc.ru

Гидрогеохимические особенности термальных источников, разгружающихся на склонах и в кратерах активных вулканов, зависят от целого ряда экзо- и эндогенных факторов, воздействующих на магматические флюиды, отделяющиеся из расплава. В первую очередь, на спектр и уровень содержаний химических элементов, а также физико-химические характеристики термальных растворов влияет степень разбавления исходного флюида грунтовыми водами. Это соотношение может существенно сдвигаться в ту или иную сторону в зависимости метеорологических и гидрологических условий на вулкане, а также от геоструктурных особенностей путей миграции флюидов к поверхности. Немаловажным фактором формирования вулканических терм является вещественный состав вмещающих вулканогенных толщ, по которым они циркулируют, выщелачивая целый ряд породообразующих и примесных элементов. Однако при прочих равных условиях наличие геохимических барьеров на пути поднимающихся растворов может существенно изменить состав поверхностных разгрузок. Разделение на конденсат и сепарат на границах вторичного кипения сильно осложняет процесс формирования состава растворов и может радикально изменить гидрогеохимические параметры термальных источников. Появляющиеся данные о широком круге микроэлементов и их специфических ассоциаций в термальных водах активных вулканов [Giampanco et al., 1998; Aiuppa et al., 2000² и др.; Бортникова и др., 2006, 2007 и др.] позволяют количественно оценить долю химических элементов, которые поступают из различных эндо- и экзогенных источников, формируя конечные растворы, наблюдаемые в поверхностных разгрузках. Совокупность гидрогеохимических данных, результатов геофизических исследований и физико-химического моделирования позволяет с определенной долей приближения представить строение вулcano-гидротермальной системы того или иного исследуемого объекта, а также понять процессы и механизмы перехода в раствор – отложения химических элементов на путях миграции флюида. Исследования газогидротермальных источников ряда активных вулканов. Расположенных на Южной Камчатке (Мутновский, Карымский. Узон, Северо-Мутновское фумарольное поле) и о-ве Парамушир (Эбеко) выявили контрастные различия в их составе и физико-химических параметрах растворов. В данной работе приводится детальный анализ гидрогеохимических особенностей различных термальных источников (водные и грязевые котлы, гейзеры), внутреннее строение их подповерхностного пространства на основе геофизических данных, дается возможное объяснение появлению в растворах тех или иных ассоциаций химических элементов.

Растворы термальных источников, обсуждаемые в данной работе, были собраны на нескольких термальных полях вулкана Мутновского (водоемы, прозрачные и грязевые котлы, поровые воды термальных площадок и серных фумарол), на Северо-Мутновском фумарольном поле (грязевые котлы и поровые растворы), в системе оз. Карымское (гейзеры Академии Наук, Восточная и Западная группы, источники на п-ове Новогоднем, включая руч. Горячий, термальные источники по берегам озера), на термальном поле кальдеры Узон (грязевые котлы и термальные источники), на Северо-Восточном фумарольном поле влк. Эбеко (водяные прозрачные котлы). Геологическое строение, структурные особенности, температурный и газовый режим, история формирования упомянутых вулканов хорошо описаны в литературе, поэтому на данных вопросах здесь останавливаться не будем.

В течение ряда лет (2001 – 2008) проводилось подробное опробование термальных источников изучаемых гидротермальных систем. Пробы растворов отбирались в пластиковые контейнеры и после фильтрования, консервировались ультра-чистой HNO₃ (кроме кислых и ультракислых растворов). На месте замерялись pH, Eh, Cl⁻, F⁻. Кроме растворов, были собраны

пробы влажного вещества на термальных площадках влк. Мутновского, Эбеко, Северо-Мутновского поля, из которых в лабораторных условиях отдавливались поровые растворы. Все пробы проанализированы на широкий круг элементов методами ИСП-АЭС, ААС, выборочно содержания РЗЭ и ЭПГ определялись методом ИСП-МС.

Электромагнитное частотное зондирование проведено в 2007 – 2009 гг. с применением аппаратно-программного комплекса ЭМС. Комплекс разработан и изготовлен в ИНГГ СО РАН. Зондирования производились на 14 частотах в диапазоне 2.5 – 250 КГц. Получаемая информация обрабатывалась программой Isystem, входящей в состав комплекса.

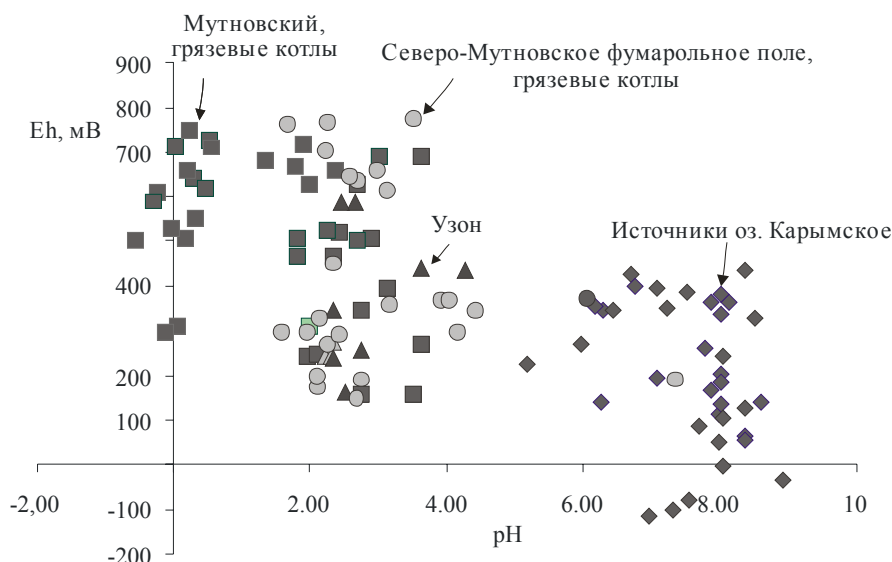


Рис. 1. Физико-химические параметры растворов в термальных источниках вулканов.

Рассматриваемые термальные системы представляют собой разгрузки контрастных типов растворов как по физико-химическим параметрам, так и по составу. Значения pH – Eh параметров изменяются от щелочной слабовосстановительной обстановки (руч. Горячий на поле Новогоднем, оз. Карымское) до ультра-кислой сильноокислительной (грязевые котлы Мутновского вулкана, рис. 1). Параметры растворов грязевых котлов Узона, Северо-Мутновского фумарольного поля располагаются на диаграмме pH-Eh между этими крайними типами. Уровень минерализации растворов связан с их кислотностью слабой отрицательной зависимостью. Однако существует разница для разных типов источников. Если для растворов Северо-Мутновского поля эта зависимость наиболее ясно выражена, несколько слабее она проявлена для растворов влк. Мутновский. В растворах источников оз Карымское общая минерализация практически не зависит от кислотности растворов. Основные анионы во всех растворах – это сульфат и хлорид, в разных соотношениях и концентрациях. Только в нескольких источниках оз Карымское ведущим анионом является гидрокарбонат. Содержания хлоридов и сульфатов изменяются в пределах 5-6-ти порядков (рис. 2). В кислых и ультракислых растворах влк. Мутновского и Северо-Мутновского поля содержания хлоридов возрастают со снижением значений pH, а в щелочных растворах Карымского определенной зависимости концентраций хлоридов от значений pH нет. Сульфаты возрастают с понижением pH в растворах Северо-Мутновского, т.е. в кислых растворах, а в котлах Мутновского, так же, как и в источниках Карымского, концентрации сульфатов изменяются незакономерно.

Из катионов в большинстве растворов Карымского преобладающим является натрий, в то время как в растворах Мутновского и Северо-Мутновского – Fe и Al в разных пропорциях. Но в каждой группе есть отличающиеся источники. Например, в нескольких источниках по берегу оз Карымского ведущий катион – Ca, а в одном из Медвежьих источников – K. В одном из котлов Северо-Мутновского поля основную долю составляет NH_4^+ . Как видно из краткого обзора концентраций основных ионов в рассматриваемых растворах, их состав весьма изменчив даже в пределах отдельных групп и, видимо, зависит от множества различных факторов.

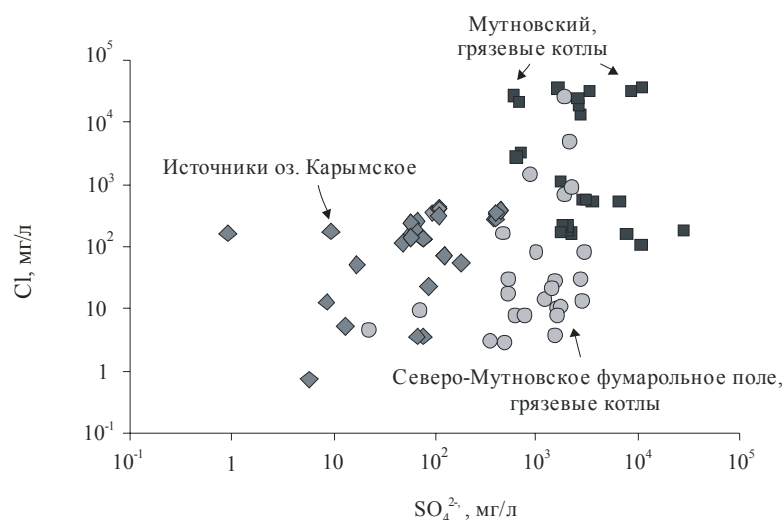


Рис. 2. Содержание основных анионов в растворах изученных источников.

Содержания микроэлементов в растворах колеблются также в широких пределах. К микроэлементам в данном случае мы относим элементы, долевого участия которых в составе растворов ниже 1 мг-экв %. Поэтому такие элементы, как Fe и Al, являясь в растворах Мутновских и Северо-Мутновских источников основными катионами, в растворах Карымских источников попадают в группу микроэлементов. В этом заключается некоторая сложность при обсуждении состава, но высокая контрастность содержаний не позволяет принять унифицированный подход ко всем изучаемым группам. Элементы, обнаруженные в растворах источников, можно разделить на несколько ассоциаций, основываясь в первую очередь, на сходстве их геохимических свойств, формах нахождения в породах (базальтах) и корреляционных зависимостях (таблица). Суммарные содержания элементов каждой из ассоциаций (так же, как и содержания основных анионов) колеблются в пределах 5-6 порядков и достигают высоких значений. Для разных групп источников выделяются характерные ассоциации элементов: для растворов Мутновского вулкана это Ti-V-Co-Cr-Ni и Zn-Cu (Pb-Cd-Ag имеют резко подчиненное значение в этой ассоциации); для источников Узона это As-Sb и Li-Rb. За исключением ассоциации анионогенов, суммарные концентрации элементов возрастают с ростом общей минерализации растворов Мутновских и Северо-Мутновских источников. В источниках оз. Карымского такой зависимости не наблюдается. Проблема заключается в объяснении контрастных различий растворов и в создании наиболее адекватной модели путей поступления химических элементов в поверхностные разгрузки гидротермальных систем.

Таблица. Пределы содержаний элементных ассоциаций в термальных источниках, мг/л.

	Fe + Mn	Ti + V + Co + Cr + Ni	Zn + Cu + Pb + Cd + Ag	Li + Rb	As + Sb + Se + Bi
Карымский	0.047 - 11	<0.01– 0.051	0.008 – 0.79	0.004 – 0.95	<0.1 – 1.5
Мутновский	0.71 – 53 г/л	<0.01 - 750	0.11 - 230	<0.1 - 14	<0.1 – 82
Северо- Мутновские	0.07 - 1300	<0.01– 7.4	0.026 - 14	0.004 – 0.03	<0.1 – 8.5
Узон	0.35 - 3100	<0.01 - 22	<0.003 - 13	<0.1 - 71	<0.1 - 820
Эбеко	0.067 - 170	<0.01 – 7.0	0.0015 – 0.17	0.011 – 0.61	<0.1– 0.039

Высокая корреляция между 1-ой, 2-ой ($r_B = 0.814$) и 3-ей ($r_B = 0.956$) ассоциациями указывает на их совмещенную миграцию и сходное поведение при выщелачивании из пород постройки и дальнейшем транспорте минерализованных флюидов. Элементы Ti-V-Co-Cr-Ni приурочены в породах (базальтах, андезитобазальтах) к единому минеральному парагенезису: Ni и Co концентрируются в оливинах, Cr - в пироксенах, Ti и V - во вкрапленниках магнетита и титаномагнетита, что, видимо, и определяет их дальнейший совместный путь. Цинк и медь приурочены к титаномагнетиту (для меди, кроме того, очень характерна сульфидная форма). Эти минералы растворяются в первую очередь при воздействии на них кислых

высокоокисленных магматических газов. Причем существуют определенные условия [Зеленов, 1965], при которых титан способен переноситься в газовой фазе из глубоких частей вулканической постройки и быть достаточно подвижным вплоть до выноса на поверхность. Ванадий и хром, проявляя анионогенные свойства [Wehrli and Stumm, 1989], также могут оставаться в растворах в течение многочисленных преобразований на пути их подъема. В фундаменте постройки влк. Мутновский андезибазальты с повышенными содержаниями обсуждаемых элементов (~ в 5 раз по сравнению с другими породами разреза [Шевко и Гора, 2009]), которые являются предположительно их источниками при воздействии на породы агрессивных флюидов (их происхождение мы обсуждали ранее [Бортникова и др., 2007]). Однако появление таких высоких концентраций данной ассоциации в растворах невозможно без дополнительного концентрирования на фазовых барьерах, которое ведет к разделению растворов на конденсат и сепарат, таким образом формируя высокоминерализованные растворы с уникальными содержаниями многих элементов. Подвижная граница фазового барьера, подходя к поверхности (это может происходить в сухие холодные периоды, когда снеготаяние не происходит, и разбавление метеорными водами поднимающихся растворов минимально), дает выход сепаратов в виде разгрузок в котлах, либо их нахождение в поровом пространстве (что и было установлено опробованием 2006 г поровых растворов на термальных площадках Донного поля). Пятая ассоциация элементов (As+Sb+Se+Bi+Te), приуроченная в породах, так же, как и Li с Rb, к остаточным стеклам, извлекается при их растворении, но путь этих элементов несколько иной, о чем свидетельствует низкий коэффициент корреляции между данной и другими ассоциациями. Подвижные анионогены, наоборот, могут в гораздо большей степени поступать в конденсат и уноситься с паровой фазой. Не исключено, что именно такой механизм осуществляется при обогащении мышьяком и сурьмой (в меньшей степени другими анионогенами) котлов и источников Узона.

Частотным электрическим зондированием (ЧЗ) получена геометрия зональности подповерхностного пространства исследуемых объектов. Показано, что различия в составе термальных растворов в какой-то степени могут быть объяснены гидрогеохимической зональностью термальных систем, которая в свою очередь определяется уровнем фазовых барьеров. На профилях ЧЗ Донного поля влк. Мутновский отчетливо проявлено вертикальное строение подводящих каналов и достижение высокоминерализованных растворов (зоны с низким удельным сопротивлением) поверхности. В то же время на контрастном типе Карымских гейзеров (источники Академии Наук) зафиксировано, что на исследуемой глубине (~ 7 м) растворы с аналогичными характеристиками отсутствуют, а поверхностные выходы терм являются результатом большего вклада поверхностных вод.

Физико-химическое моделирование, проведенное для выяснения генезиса различных типов растворов, показало, что субщелочные хлоридно-натриевые источники (Карымского типа) могут быть сформированы магматогенными флюидами, поднимающимися к поверхности без существенного взаимодействия с вмещающими породами, а соответственно, без выщелачивания дополнительных элементов. Ультракислые и кислые растворы грязевых котлов влк. Мутновский являются результатом многочисленных преобразований исходных флюидов, которые на своем пути провзаимодействовали в породами вулканической постройки. Источником металлов могут быть глубокие части разреза вулканической постройки, где на предшествующих стадиях метасоматоза возможно отложение Co, Cr, Ni, V с последующим их вовлечением в гидротермальный процесс.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-05-00910) и Интеграционного проекта СО-ДВО РАН № 96.

Список литературы

Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Трофимова Л.Б. и др. Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о-в Парамушир) // Вулканология и сейсмология, 2006. № 1. С. 39-51.

Бортникова С.Б., Шарапов В.Н., Бессонова Е.П. Гидрогеохимический состав источников поля Донного Мутновского вулкана (Южная Камчатка) и проблемы их связи с надкритическими магматическими флюидами // Докл. РАН, 2007. 413. № 4. С. 530-534.

Зеленов К.К. Вулканогенный титан в зоне гипергенеза // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая, 1965. № 10. С. 63 – 74.

Шевко А.Я., Гора М.П., Кузьмин Д.Ю. К оценке глубинности питающего очага для лав базальтов и андезибазальтов Мутновского вулкана. Наст. сборник, 2009.

Aiuppa A., Allard P., d'Alessandro W. et al. Mobility and fluxes of major, minor and trace metals during basalt weathering and groundwater transport at Mt. Etna volcano (Sicily) // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000¹. 64. № 11. P. 1827-1841.

Aiuppa A., Dongara G., Capasso G., Allard P. Trace elements in the thermal groundwaters of Vulcano Island (Sicily) // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. 2000². 98. P. 189-207.

Giammanco S., Ottavian M., Valenza M. et al. Major and trace elements geochemistry in the ground waters of a volcanic area: Mount Etna (Sicily, Italy) // *War.Res.*, 1998. 32. № 1. P. 19–30.

Wehrli B., Stumm, W. Vanadium in natural waters: adsorption and hydrolysis promote oxygenation // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989. 53. P. 69–77.