

Формирование высоко магниевого углекислых вод в районах активного вулканизма**Таран Ю.А.****Origin of high Mg and CO₂ – enriched thermal waters in areas of active volcanism****Taran Yu.A.***Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: yuri.taran@gmail.com*

С помощью термохимического моделирования я попытался объяснить, как формируются термальные углекислые воды Камчатки (Нижне-Щапинские, Карымские, Налычевские, Дзэндзурские), в которых концентрация магния превышает концентрацию кальция. Эти воды разгружаются у оснований действующих вулканов в контакте с вулканической породой при высоком отношении вода/порода и высоком парциальном давлении CO₂.

Катионный состав природных вод контролируется, главным образом, взаимодействием вода-порода, т.е. катионы (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, ...) переходят в воду из пород. Растворение породы может быть неравновесным, как это происходит при химическом выветривании породы грунтовыми или поверхностными водами, или при почти полном растворении породы кислыми «вулканическими» водами. При высоких температурах в гидротермальных резервуарах растворение пород в большой степени контролируется равновесием растворенных компонентов с набором гидротермальных минералов. Это обстоятельство позволило разработать так называемые гидрохимические геотермометры: Na-K, K-Mg, SiO₂ и некоторые другие. Чем выше температура контакта воды с гидротермально измененной породой, тем ниже отношение Na/K и тем ниже концентрация магния. Если соотношение между Na и K определяется, главным образом, равновесием и ионным обменом в системе «альбит-микроклин-раствор», то концентрация магния в растворе определяется устойчивостью минералов, содержащих магний, таких как хлорит и некоторые другие, которые устойчивы при высоких температурах и превращаются в свободные или почти свободные от магния глинистые минералы при низких температурах. То, что с ростом температуры концентрация магния в воде уменьшается, было отмечено давно. До сих пор химический состав термальных вод дна океана экстраполируют «на нулевой Mg». Вернер Гиггенбах [5] провел соответствующие термодинамические расчеты и предложил несколько достаточно простых и до сих пор весьма популярных диаграмм, включающих концентрации главных катионов (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), которые, с одной стороны, оценивают температуру термальной воды на глубине формирования, а с другой – показывают, насколько данный раствор близок или далек от равновесия с породой.

Если посмотреть на некоторые наборы данных по гидрохимии термальных вод, например, на таблицы составов термальных вод Камчатки, приведенные в монографии Ю.П. Трухина [2], можно видеть, что в подавляющем большинстве случаев соблюдаются правила: Na⁺>K⁺ и Ca²⁺>Mg²⁺. То есть магния почти всегда меньше всего, а отношение Ca/Mg практически всегда >1. Однако для камчатских термальных вод несколько случаев выпадают из этого правила, причем выпадают достаточно закономерно (рис. 1). Все воды с Ca/Mg <1 относятся к углекислым, с содержанием бикарбонат-иона от 800 мг/л и выше, с максимальными температурами выходов не выше 40 °С и с обильным выделением свободного газа при содержании CO₂ более 95 об. %. К наиболее известным термальным источникам такого типа на Камчатке относятся Карымские, Нижне-Дзэндзурские, Нижне-Щапинские и отдельные группы Налычевского геотермального района. Воды Нижне-Дзэндзурских и Нижне-Щапинских похожи тем, что имеют также необычно низкие концентрации сульфат-

иона, ниже 5 мг/л. Карымские источники, наоборот, содержат сравнительно высокие концентрации SO_4^{2+} , до 800 мг/л.

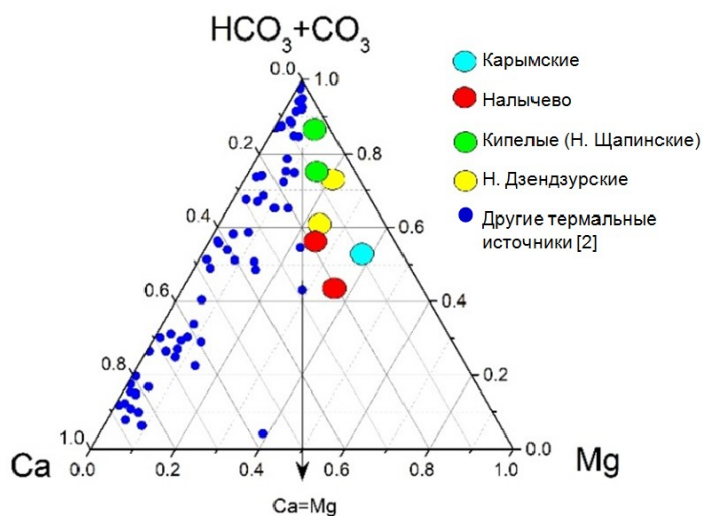


Рис. 1. Треугольная диаграмма относительных концентраций Ca, Mg и HCO_3 (ммоль/л) в термальных водах Камчатки.

Общим для этих источников является то, что они разгружаются из вулканических и вулканогенно-осадочных пород, в отличие, например, от многочисленных углекислых источников Кавказа [1].

В мире известно не так много термальных и поверхностных вод, в которых концентрация магния превышает концентрацию кальция. Кроме океана, где $\text{Mg} \gg \text{Ca}$ (1280 ppm по сравнению с 400 ppm). Однако существует хорошо изученный вулканический район, где такие воды разгружаются на большой площади. Это склоны вулкана Этна на о. Сицилия [3, 4]. Постройка вулкана служит областью водного питания, и имеется множество выходов нисходящих грунтовых вод вокруг вулкана, контактирующих исключительно с продуктами извержения, т.е. с базальтами вулкана Этна. Отличительной особенностью этих поверхностных вод является высокое, до очень высокого, содержание бикарбонат-иона (рис. 2). Это связано с высоким диффузионным потоком вулканического CO_2 , отделяющегося на глубине от питающей магматической системы этого одного из самых активных вулканов Земли.

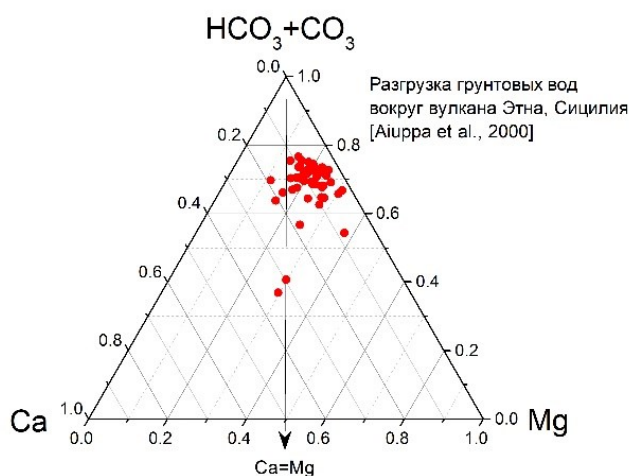


Рис. 2. Треугольная диаграмма относительных концентраций Ca, Mg и HCO_3+CO_3 (ммоль/л) в поверхностных водах вулкана Этна.

В настоящей работе предлагается модель образования таких вод, основанная на термохимическом моделировании взаимодействия вода-порода. С помощью пакета программ HSC-7 показано, что при равновесии вода-порода высоко магниевые составы получаются при малых степенях взаимодействия (высокие отношения вода/порода) и

при низких температурах (<100 °С). Главным условием формирования таких вод служит постоянное высокое давление CO₂, т.е. система должна быть открытой по отношению к источнику CO₂. Таким «буфером» CO₂ в вулканических районах являются долгоживущие потоки CO₂ от дегазирующих магматических очагов. В качестве начальных растворов рассматривались чистая вода, «кислый» раствор HCl+H₂SO₄ (1:2) с pH=1, а также нейтральные растворы Na-Cl-SO₄. В качестве породы брались изверженные породы от базальтов до дацитов (рис. 3). Показано также, в какой степени состав породы – содержания и отношения Mg и Ca – влияет на состав образующихся растворов.

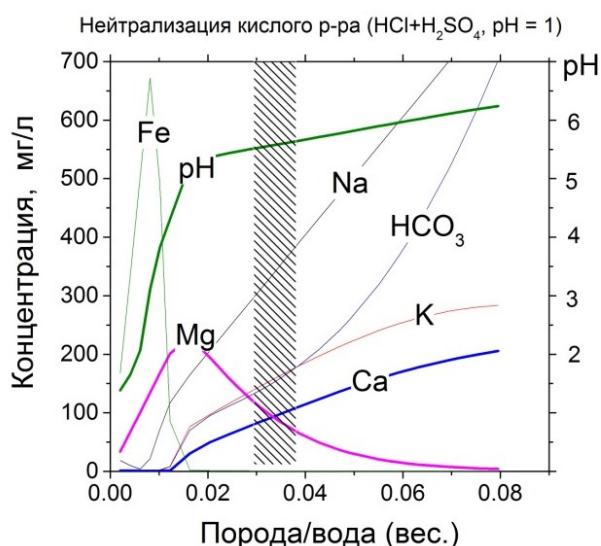


Рис. 3. Пример результатов расчета равновесия «кислый раствор-базальт» при температуре 75 °С. При малых отношениях порода/вода Mg>Ca. При pH~5.5 и отношении П/В выше 0.035 (воды по весу примерно в 30 раз больше, чем породы) Ca>Mg.

Моделирование в целом подтверждает наблюдаемые особенности высоко магниевых углекислых вод. Действительно, эти системы имеют высокий расход, т.е. высокое отношение вода/порода. Например, общий расход Карымских источников превышает 700 л/с [6]. Температуры выхода редко превышают 40 °С; это может означать, что формирование состава вод осуществляется на небольших глубинах.

Список литературы

1. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа / Труды Геологического института. Вып. 599. 2012. 348 с.
2. Трухин Ю.П. Геохимия современных геотермальных процессов и перспективные геотехнологии. М.: Наука, 2003. 376 с.
3. 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*. 2000. V. 64. P. 1827-1841.
4. Brusca L., Aiuppa A., D'Alessandro W. et al. Geochemical mapping of magmatic gas–water–rock interactions in the aquifer of Mount Etna volcano // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2001. V. 108. P. 199-218.
5. Giggenbach W.F. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-k-Mg-Ca Geoindicators // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1988. V. 52. P. 2749-2765.
6. Taran Y., Kalacheva E., Inguaggiato S. et al. Hydrothermal systems of the Karymsky Volcanic Centre, Kamchatka: Geochemistry, time evolution and solute fluxes // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2017. V. 346. P. 28-39. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.05.023