Гидрогеохимические особенности разных типов флюидных систем

Никитенко О.А.

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия, E-mail: nikitenko.olga@list.ru

АННОТАЦИЯ: В работе выполнен сравнительный анализ гидрогеохимических показателей для флюидных систем разных типов: грязевых вулканов, термальных источников, осадочно-гидротермальных и гидротермально-магматических систем. Установлено, что отсутствуют какие-либо явно выраженные различия между химическим составом вод грязевых вулканов и осадочно-гидротермальных систем. Это оставляет открытым вопрос о разном генезисе данных флюидных систем. Тогда как гидротермально-магматические системы характеризуются уникальными гидрогеохимическими свойствами, которые существенно отличаются от остальных рассматриваемых флюидных систем.

Hydrogeochemical features of different types of fluid systems

Nikitenko O.A.

Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, E-mail: nikitenko.olga@list.ru

ABSTRACT: The present paper is a comparative study of hydrogeochemical characteristics of the different types of fluid systems: mud volcanoes, thermal springs, sediment-hosted hydrothermal systems and hydrothermal-magmatic systems. It was found that there are no any pronounced differences between the chemical composition of the waters of mud volcanoes and sediment-hosted hydrothermal systems. This leaves open the question of the different genesis of these fluid systems. Whereas hydrothermal-magmatic systems are characterized by unique hydrogeochemical properties, which differ significantly from the other fluid systems under consideration

ВВЕДЕНИЕ

В земной коре содержатся флюиды, различающиеся по своему составу и происхождению. Флюидная активность недр проявляется в многообразии форм разгрузки флюидов на земную поверхность – термальных источников, грязевых вулканов, грязевых котлов и т.д. Для разграничения разных форм разгрузки подземных флюидов на земную поверхность часто используются их геоморфологические характеристики. Однако очевидно, что разграничение, основанное только на морфологических признаках подобных геологических объектов, является достаточно субъективным. Например, к грязевым вулканам некоторые исследователи относят грязевые котлы и грифоны на магматических вулканах. Поэтому типизация флюидных систем по геохимическим признакам на сегодняшний день является актуальной задачей.

В работе [6] предложено разделять флюидные системы на три типа – гидротермально-магматические, осадочно-углеводородные и осадочно-гидротермальные. В качестве критериев разделения были выбраны газогеохимические особенности флюидов и региональные геологические условия. Стоит отметить, что грязевые вулканы в указанной работе относят ко второму типу, отделяя их от внешне схожих с ними осадочно-гидротермальных систем. К осадочно-гидротермальным системам было

предложено относить, в частности, флюидную систему Lusi, которая изначально считалась грязевым вулканом. Анализ работы [6] показывает, что границы между флюидными системами разных типов являются довольно нечеткими и этот вопрос требует проведения дополнительных исследований.

Для определения генезиса флюидных систем информативной может являться их гидрогеохимическая специализация. Различные источники и условия формирования подземных флюидов в той или иной степени находят отражение в изотопном и химическом составе водной компоненты флюида. В этой связи целью настоящей работы являлось определение возможных критериев разграничения разных типов флюидных систем по гидрогеохимическим данным.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для выявления критериев разделения разных типов флюидных систем по геохимическим признакам проводился сравнительный анализ химического состава водной компоненты флюидов. Сравнение проводилось на основе собственных и опубликованных [1-5, 7, 8] гидрогеохимических данных для флюидных систем разного типа. В качестве объектов исследований были выбраны грязевые вулканы Азербайджана, Керченского п-ова и о-ва Сахалин (Южно-Сахалинский грязевой вулкан), Дагинское

месторождение термоминеральных вод (о-в Сахалин), осадочно-гидротермальные системы Salton Sea (США, Калифорния) и Lusi (Индонезия), а также гидротермально-магматические системы Камчатки и Курильских о-вов, включающие грязевые котлы кальдеры Узон, вулкана Мутновский (п-ов Камчатка) и вулкана Баранского (о-в Итуруп), термальные источники кальдеры Головнина на берегах озера Кипящее и вулкана Менделеева в районе ручья Кислый (о-в Кунашир).

В соответствии с типизацией флюидных систем, предложенной в работе [6], грязевые вулканы и термальные источники Дагинского месторождения в настоящей работе были отнесены к осадочно-углеводородным системам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ собранных данных показал, что рассматриваемые флюидные системы довольно сильно различаются по гидрогеохимическим параметрам. Минерализация исследуемых вод изменяется в очень широких пределах: от нескольких десятков миллиграммов до сотен граммов на литр. Показатель pH также сильно варьирует: от ультракислых до щелочных зна-

чений. При этом уровень минерализации и показатель pH связаны между собой нелинейной корреляционной зависимостью (рис. 1). На рисунке 1 видно, что фигуративные точки на графике образуют два обособленных поля. Для флюидных систем, расположенных в районах магматического вулканизма, характерны очень низкие значения pH – основная часть точек находится в ультракислой–кислой области. Минерализация и pH этих вод связаны отрицательной зависимостью – по мере роста минерализации закономерно уменьшаются значения pH. В свою очередь, воды грязевых вулканов, термальных источников Дагинского месторождения, а также Salton Sea и Lusi имеют более высокий показатель pH и в основном располагаются в околонейтральной–щелочной области. Для этих вод зависимость между минерализацией и pH имеет положительный характер – с повышением минерализации отмечается возрастание величины pH. Стоит отметить, что для каждой отдельной флюидной системы зависимость между минерализацией и pH имеет разную силу связи, а в некоторых случаях зависимость вовсе отсутствует.

Рис. 1. Соотношение общей минерализации и pH вод разных типов флюидных систем: 1 – Дагинские термальные источники, 2 – термальные источники кальдеры Головнина на берегах оз. Кипящее; 3 – термальные источники вулкана Менделеева в районе руч. Кислый; 4 – грязевые котлы кальдеры Узон; 5 – грязевые котлы вулкана Мутновский (Северо-Мутновское фумарольное поле); 6 – грязевые котлы вулкана Мутновский (Донное фумарольное поле); 7 – грязевые котлы вулкана Баранского; 8 – Южно-Сахалинский грязевой вулкан; 9 – грязевые вулканы Азербайджана; 10 – грязевые вулканы Керченского п-ова; 11 – Salton Sea; 12 – Lusi.

Концентрации основных катионов и анионов в водах разных флюидных систем также значительно отличаются. В ряде случаев эти различия могут составлять несколько порядков. Кроме того, во многих отдельных флюидных системах химический состав вод весьма неоднороден и имеет различную минерализацию. Основными анионами вод грязевых котлов и термальных источников на магматических вулканах являются Cl^- и SO_4^{2-} в разном соотноше-

нии и разных концентрациях. Катионный состав этих вод очень неоднороден. Катионы Na^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} , которые обычно являются основными в природных водах, составляют меньшую долю в водах вулкано-гидротермальных систем. Главной особенностью этих вод является высокие концентрации алюминия и железа, которые играют преобладающую роль в их составе. Однако в некоторых случаях Na^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} выступают доминирующими катионами.

Между тем воды грязевых вулканов, Дагинского месторождения и осадочно-гидротермальных систем Salton Sea и Lusi очень схожи по своему химическому составу. В катионном составе вод грязевых вулканов доминирует Na^+ , среди анионов – Cl^- и HCO_3^- в разном соотношении. Воды осадочно-гидротермальных систем Salton Sea, Lusi, а также Дагинских термоминеральных источников характеризуются практически исключительным преобладанием Na^+ и Cl^- в своем составе. К второстепенным катионам и анионам этих вод относятся K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} и SO_4^{2-} .

Между содержанием Na^+ и Cl^- в водах грязевых вулканов, термальных вод Дагинского месторождения, Salton Sea и Lusi установлена сильная корреляционная зависимость. Коэффициент корреляции Пирсона между Na^+ и Cl^- для вод грязевых вулканов составляет 0,89, для вод Дагинского месторождения, Salton Sea и Lusi – коэффициент корреляции близок к единице. Повышение минерализации в этих водах происходит главным образом за счет увеличения концентрации этих элементов (коэффициенты корреляции Пирсона близки к единице). Также высокая корреляционная зависимость между Na^+ и Cl^- говорит об общности их источника. В свою очередь, для вод грязевых котлов и термальных источников на магматических вулканах корреляция между Na^+ и Cl^- не установлена (коэффициент корреляции Пирсона равен 0,19). Тогда как общая минерализация этих вод связана прямой зависимостью с содержанием таких анионов как Cl^- и SO_4^{2-} (коэффициент корреляции Пирсона равен 0,99 и 0,40 соответственно), а также Al и Fe (коэффициент корреляции Пирсона равен 0,52 и 0,54 соответственно).

Отношение Na/Cl , которое обычно используется для выяснения генезиса природных вод, для Lusi и Salton Sea в среднем составляют 0,63 и 0,67 соответственно, что очень близко к аналогичному отношению для морской воды (которое составляет 0,55). В термальных водах Дагинского месторождения отношение Na/Cl в среднем составляет 0,72, что тоже является довольно близким к значению данного показателя для морской воды. Для вод грязевых вулканов отношение Na/Cl изменяется довольно в широких пределах, составляя в среднем 0,88 для вод вулканов Азербайджана, 1,01 для вод вулканов Керченского п-ова и 1,48 для вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Исходя из предположения, что водное питание грязевых вулканов происходит за счет разгрузки седиментационно-погребенных морских вод, отношение Na/Cl отражает разную степень метаморфизации этих вод.

Воды флюидных систем районов магматического вулканизма из-за пестроты химического состава характеризуются очень широким диапазоном значений Na/Cl . Однако для этих вод в основном характерны или очень низкие или, наоборот, очень высокие значения отношения Na/Cl , которые существенно отличаются от данного соотношения в морской воде. Значения Na/Cl в водах гидротермально-магматических систем регулируются соотношением Cl^- и SO_4^{2-} . При доминировании в анионном составе Cl^- в водах наблюдается снижение значений Na/Cl . Отдельно здесь необходимо отметить воды грязевых котлов на вулкане Мутновский в пределах Донного фумарольного поля, для которых характерны наиболее высокие концентрации Cl^- (до 74 г/л) и соответственно самые низкие значения Na/Cl (в среднем 0,01). Наиболее высокие значения отношения Na/Cl установлены для вод грязевых котлов кальдеры Узон, для которых максимальное значение этого показателя достигает 1700.

Важнейшими показателями специфики исследуемых вод является содержание таких микрокомпонентов как Li и B, которые отражают глубину и степень метаморфизации подземных вод. Концентрации данных элементов в водах рассматриваемых флюидных систем довольно сильно различаются (рис. 2). Однако четкого разделения разных типов флюидных систем на диаграмме $\text{Cl}-1000*\text{Li}-25*\text{B}$ не наблюдается. Соотношение концентраций Cl, Li и B показало, что довольно сильно обогащены бором и литием воды грязевых вулканов. Также достаточно высокое содержание лития установлено в водах осадочно-гидротермальной системы Salton Sea. Воды гидротермально-магматических систем характеризуются разной степенью обогащения бором и литием, однако, большая часть проб отличается достаточно низким содержанием данных элементов. Исключением этому являются воды термальных источников кальдеры Головнина на берегах оз. Кипящее и грязевых котлов кальдеры Узон, для которых характерно значительное обогащение данными микроэлементами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный сравнительный анализ гидрогеохимических характеристик гидротермально-магматических, осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных систем показал, что границы между флюидными системами разных типов являются нечеткими. Гидрогеохимические параметры флюидов не позволяют произвести типизацию этих систем.

Рис. 2. Соотношение концентраций Cl, Li и B (в мг/л) в водах разных типов флюидных систем. Условные обозначения см. на рис. 1.

Сравнительный анализ химического состава жидкой фазы выбросов грязевых вулканов и осадочно-гидротермальных систем Salton Sea и Lusi показывает, что эти флюидные системы имеют схожие гидрогеохимические признаки, что оставляет открытым вопрос о разном генезисе данных флюидных систем. В свою очередь, гидротермально-магматические системы характеризуются довольно уникальными гидрогеохимическими свойствами, которые существенно отличаются от остальных рассматриваемых флюидных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 17-17-01056.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Гора М.П. и др. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – 282 с.
2. Жарков Р.Ф. Современные физико-химические особенности термоминеральных вод Дагинского месторождения (о. Сахалин) // Мониторинг, наука и технологии. – Вып. 4. – № 37. – 2018. – С. 35-40.
3. Калачева Е.Г., Таран Ю.А. Процессы, контролируемые изотопный состав (δD и $\delta^{18}O$) термальных

вод Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. – № 4. – 2019. – С. 3–17.

4. Mazzini A., Svensen H.H., Etiope G., Onderdonk N., Banks D. Fluid origin, gas fluxes and plumbing system in the sediment-hosted Salton Sea Geothermal System (California, USA) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – V. 205. № 3-4. – 2011. – P. 67-83.
5. Mazzini A., Scholz F., Svensen H.H., Hensen C., Hadi S. The geochemistry and origin of the hydrothermal water erupted at Lusi, Indonesia // Marine and Petroleum Geology. – V. 90. – 2018. – P. 52-66.
6. Procesi M., Ciotoli G., Mazzini A., Etiope G. Sediment-hosted geothermal systems: Review and first global mapping // Earth-Science Reviews. – V. 192. – 2019. – P. 529–544.
7. Svensen H., Karlsen D.A., Sturz A., Backer-Owe K., Banks D.A., Planke S. Processes controlling water and hydrocarbon composition in seeps from the Salton Sea geothermal system, California, USA // Geology. – V. 35. – № 1. – 2007. – P. 85-88.
8. Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Lavrushin V.Yu., Belogub E.V., Khvorov P.V., Kikvadze O.E. Boron in an onshore mud volcanic environment: Case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone // Chemical Geology. – V. 525. – 2019. – P. 58-81.