Рассолы Сибирской платформы как последний этап эволюции системы вода-порода

Трифонов Н.С.¹

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, Россия, E-mail: Trifonovnik@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Проведены физико-химические расчеты равновесий в системе вода-порода. Установлено, что взаимодействие рассолов с вмещающими породами, в частности с силикатами и алюмосиликатами, представляет собой один из возможных путей формирования и последующей метаморфизации их химического состава вследствие обмена веществом с твердой фазой.

Brines of the Siberian platform as the last stage of evolution water-rock system

Trifonov N.S.¹

¹Tomsk Affiliate of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia, E-mail: Trifonovnik@mail.ru

ANNOTATION: Physicochemical calculations of the equilibria in the water-rock system are carried out. It was found that the interaction of brines with host rocks, in particular with silicates and aluminosilicates, is one of the possible ways formation and subsequent metamorphization their chemical composition due to the exchange of matter with the solid phase.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы формирования и преобразования химического состава рассолов, имеющих достаточно широкое распространение в осадочной оболочке земной коры, являются весьма дискуссионными, хотя и наметились пути сближения имеющихся точек зрения. Большинство исследователей сходятся на том, что рассолы представляют собой захороненные морские воды разной стадии испарительного концентрирования, существенно измененные в процессе их взаимодействия с вмещающими горными породами на стадиях диа- и катагенеза.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований являются подземные рассолы Сибирской платформы, в частности рассолы Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции (ЮТЗ).

Для оценки степени метаморфизации рассолов использовался интегрированный показатель метаморфизации рассолов (S), который равен сумме относительных значений Ca/Cl , Sr/Cl и Br/Cl т.е. тех элементов, содержания которых наиболее активно растут в процессе метаморфизации рассолов. Относительность принятых значений каждого из исходных коэффициентов заключается в том, что их средние значения для морской рапы (поскольку в регионе широким распространением пользуются ангидритовые и галитовые соли, сравнивать необходимо с составом рапы, формирующейся на стадии садки галита) приняты за единицу, относительно которой и рассчитаны их значения в каждой пробе. Это сделано для того, чтобы уравнивать вклад каждого из коэффициентов в процессе метаморфизации рассолов. К наиболее метаморфи-

зованным рассолам относятся рассолы с $S > 300$; средне-метаморфизованным – с $100 < S < 300$; слабо- и неметаморфизованными – с $S < 100$.

Для оценки степени насыщения раствора относительно минералов использовались соответствующие параметры насыщенности $L = \ln(K/P)$, где K – константа равновесия осаждения минерала из раствора, P – произведение активности веществ, участвующих в этой реакции. Отрицательные значения L свидетельствуют о недонасыщении, положительные о пересыщении, а близкие к нулю – о равновесии раствора и соответствующего минерала. Исходя из наиболее характерных значений степени насыщения соленых вод и рассолов относительно различных минералов, все они М.Б. Букаты условно разбиты на три группы: равновесные и близкие к равновесию ($L > -5$), умеренно недонасыщенные и недонасыщенные (от $-5 > L > -15$) и резко недонасыщенные ($L < -15$) [1]. Расчёты параметра L выполнялись с использованием программного комплекса численного физико-химического моделирования геохимических процессов в системе вода-порода HydroGeo с учетом пластовых температуры и давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Преобладание в растворе тех или иных химических элементов не случайно, а определяется особенностями происхождения и последующего преобразования вод. Поэтому на предыдущем этапе исследований изучаемые воды были разделены по их генезису.

По рассчитанным значениям генетических коэффициентов, установлено, что все рассолы подсолёвой (рифей, венд) и соленосной (ниж-

ний кембрий) гидрогеологических формаций в пределах ЮТЗ являются седиментационными. Соленые воды и рассолы вышележащих водоносных комплексов, входящих в состав надсолевой гидрогеологической формации (Є₁₋₂ ангарско-литвинцевская свита, ордовик, триас), являются инфильтрационными (но, также могут вмещать в различной степени разбавленные внутрипластовые инъекции преимущественно седиментационных рассолов из горизонтов нижележащей формации) [2].

Последующие процессы преобразования химического состава подземных вод и в том числе рассолов (метаморфизация) помимо внешнего

воздействия определяются характером их взаимодействия с вмещающими породами. Проявляется этот процесс в изменении содержания отдельных элементов, в частности в увеличении после захоронения вод содержаний в них Ca, Sr и Br. Все генетические разновидности рассолов, кроме собственно инфильтрационных, в той или иной степени метаморфизованы. Степень метаморфизации оценивалась по показателю S. Для построения диаграммы степени метаморфизации рассолов использовалось значение интегрированного показателя метаморфизации и rNa/rCl отношения (рис. 1).

Рис. 1. График зависимости показателя метаморфизации “S” рассолов ЮТЗ от генетического коэффициента “rNa/rCl”

Формирование состава природных вод нельзя понять, не рассматривая равновесия в системе вода-порода. В рассолах постоянно происходят, растворение и садка солей, взаимодействия сульфатных, хлоридных, силикатных и алюмосиликатных минералов, характерных для геологического разреза, выполнено на основе численного моделирования с помощью программного комплекса HydroGeo.

Реальные водные растворы представляют собой сложные электрохимические системы, в которых образуются ионные и молекулярные ассоциаты, представляющие собой более или менее прочные соединения ионов и/или молекул и гидратированных частиц. При возникновении в ассоциатах химических связей такие ассоциаты называются комплексными соединениями. Недоучет форм миграции элементов раствора в виде ассоциатов или комплексных соединений при расчетах степени равновесия в системе «вода-порода» может значительно исказить полученные результаты.

С учетом этого факта, проведенными расчетами установлено, что большая часть рассолов ЮТЗ равновесна или близка к равновесию с

жидкой и твердой фаз. Исследование физико-химического равновесия и степени насыщения подземных вод ЮТЗ относительно карбонатных, карбонатами (рис. 2). Исключение составляют только особо кислые рассолы с величиной pH – 3.2÷5.3.

Большинство точек, относящихся к седиментационным рассолам, лежат в поле равновесия с кальцитом, доломитом и стронцианитом, в меньшей степени они насыщены магнезитом. Среди сульфатных минералов наиболее яркими представителями являются ангидрит и целестин.

Практически все рассолы изучаемой территории близки к равновесию с этими минералами. Также установлено, что большая часть инфильтрационных рассолов далека от равновесия с хлоридными минералами: галитом и карналином, а седиментационные – близки к равновесию или почти равновесны. Результаты оценки степени насыщения раствора относительно силикатных и алюмосиликатных минералов, имеющих магматический или метаморфический генезис представлены на рисунке 3.

Долгое время взаимодействия рассолов с вмещающими породами, исчисляемое сотнями миллионов лет, в условиях застойного гидродинамического режима привело к тому, что изучаемые рассолы достигают равновесия не только со вторичными алюмосиликатами (гли-

ны, хлориты, иллиты), но и с первичными: альбитом и ортоклазом. Несколько точек, соответствующих рассолам с повышенными значениями рН оказались равновесными даже с анортитом (требует тщательной проверки).

Рис. 2. Степень насыщения рассолов относительно эвапоритовых минералов при пластовой температуре и давлении

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ степени равновесия подземных вод ЮТЗ с эвапоритовыми минералами (кальцит, доломит, ангидрит, галит) подтверждает тот факт, что их наличие в водоносных горизонтах (особенно в зоне застойного гидродинамического режима) определяет их равновесное или близкое к равновесию состояние и таким образом контролируют их состав. Вторичные же минералы становятся равновесными с подземными водами лишь с момента своего образования и являются продуктом такой эволюции. Таким образом, в реальных природных условиях, формирование химического состава рассолов (особенно сверх крепких хлоридных кальциевых рассолов), происходит в равновесно-неравновесной системе, в которой один минерал (анортит) растворяется, а второй (кальцит) формируется. Из-за этого невозможно установление равновесия между раствором и анортитом, который поэтому растворяется с той или иной скоростью и служит неограниченным источником кальция. Это означает, что взаимодействие рассолов с силикатами и алюмосиликатами представляет собой один из ведущих путей формирования и последующей метаморфизации химического состава подземных вод вследствие обмена веществом с твердой фазой, а вмещающих их пород за счет замещения од-

них минералов другими.

При этом в крепких рассолах преобладает разложение в первую очередь алюмосиликатов кальция и магния, характеризующихся наименьшей насыщенностью, тогда как образуются главным образом глинистые минералы калия и натрия.

Это подтверждается и резким отличием катионного состава захороняемых морских вод различных стадий сгущения (натриевый, магнево-натриевый и магниевый) от современного состава метаморфизованных подземных рассолов (кальциево-натриевый, натриево-кальциевый и кальциевый), что свидетельствует об изменении степени их насыщения относительно рассматриваемых минералов во времени. Очевидно, что начальная насыщенность рассолов относительно магниевых минералов была выше современной, а кальциевых, наоборот, более низкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Химический состав рассолов ЮТЗ, начиная с момента образования осадочного бассейна и в течение всего последующего времени его существования, определяется, главным образом, их взаимодействием с вмещающими породами, проявляя все признаки самоорганизующейся геологической системы [4].

Рис. 3. Степень насыщенности рассолов относительно алюмосиликатных минералов при пластовой температуре и давлении

Преобразование химического состава рассолов (особенно сверх крепких хлоридных кальциевых рассолов), происходит в равновесно-неравновесной системе, в которой растворение одних минералов (таких как анортит), и формирование других (таких как кальцит) не позволяет установиться равновесию между раствором и породой, которая поэтому с той или иной скоростью растворяется и служит неограниченным источником ионов (того же кальция).

Непрерывное изменение состава воды и вторичных минералов – внутренний процесс эволюции системы вода-порода, который не зависит ни от каких внешних факторов, является необратимым, нелинейным и развивается вдали от равновесия [3, 4].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 20-05-00127 и 19-05-00290.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букаты М.Б. Равновесие подземных рассолов Тунгусского бассейна (Сибирская платформа) с минералами эвапоритовых и терригенных фаций // Геология и геофизика, 1999, Т. 40 (5), с. 750-763.
2. Трифонов Н.С. Гидрогеологические условия Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции. Подземные воды Востока России: материалы Всеросс. совещания по подземным водам Востока России. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – С. 485–491.
3. Шварцев С.Л. Основное противоречие, определившее механизмы и направленность глобальной эволюции // Вестник РАН. - 2015. - Т. 85. - № 7. - С. 632.
4. Шварцев С.Л. Эволюция в неживой материи: природа, механизмы, усложнение, самоорганизация // Вестник РАН. – 2017. – Т. 87. – № 12. – С. 1091–1100.