Фракционирование микроэлементов в системе вода – порода – нефть на примере нефтегазоносных отложений арктических районов Западной Сибири

Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Борисов Е.В., Ян П.А.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия,

E-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

АННОТАЦИЯ: Приводятся первые результаты по изучению распределения более чем 60 элементов в подземных водах меловых и юрских нефтегазоносных комплексов арктических районов Западной Сибири, а также обсуждению возможных источников их поступления в раствор, среди которых главные – вмещающие горные породы и рассеянное органическое вещество. Учитывая длительное время взаимодействия в системе вода – порода (более 165 млн. лет) в наиболее активных компонентах этой системы (водах и нефтях) отмечаются общие закономерности их распределения. Установленные закономерности, за исключением Ge, Ag, In, Sn, Sb, Eu, Gd, Hg, Th и U также отмечаются у основной нефтематеринской толщи – баженовской свиты. Общая минерализация подземных вод не превышает 63,3 г/дм³ при доминировании Cl Na, Cl-HCO₃ Na и HCO₃-Cl Na типов. В наибольшей степени изученные воды обогащены Zn, Ni, Cu, Se и Pb. Спектр распределения элементов в наиболее минерализованных водах верхнеюрских отложений имеет следующий вид (мкг/дм³): Zn_{345,9} > Ni_{65,9} > Se_{34,5} > Cu_{23,5} > Pb_{15,6} > Eu_{9,9} > Co_{3,8} > As_{2,2} > Hg_{1,7} > La_{0,94} > Mo_{0,93} > Sm_{0,6} > Ge_{0,5} > Tl_{0,4} > Cd_{0,26} > Sb_{0,25} > Ce_{0,2} > Sn_{0,19} > Ga_{0,1} > Nd_{0,08} > Th_{0,04} > Bi_{0,03} > Ag_{0,025} > Lu_{0,019} > U_{0,014} > Gd_{0,013} > Tb_{0,007} > Yb_{0,0024} > In_{0,0023}.

Trace elements fractionation in the water-rock-oil system on the example of oil-and-gas-bearing deposits of Western Siberia, the Arctic regions

Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Borisov E.V., Yan P.A.

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,

E-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

ABSTRACT: The first results on the distribution of more than 60 elements in the underground waters of the Cretaceous and Jurassic oil and gas complexes of the Arctic regions of Western Siberia are presented. Possible sources of microelements entering the solution are discussed, among which the main ones are host rocks and dispersed organic matter. In the most active components of this system (water and oil), general patterns of their distribution are noted due to the long interaction time in the water-rock system (more than 165 million years). The established patterns, with the exception of Ge, Ag, In, Sn, Sb, Eu, Gd, Hg, Th, and U, are also noted in the main Bazhenov formation. The TDS of groundwater does not exceed 63.3 g/dm³ with the dominance of Cl Na, Cl-HCO₃ Na и HCO₃-Cl Na types. The most studied waters are enriched in Zn, Ni, Cu, Se, and Pb. The distribution spectrum of elements in the most mineralized waters of the Upper Jurassic deposits has the following form: Zn_{345,9} > Ni_{65,9} > Se_{34,5} > Cu_{23,5} > Pb_{15,6} > Eu_{9,9} > Co_{3,8} > As_{2,2} > Hg_{1,7} > La_{0,94} > Mo_{0,93} > Sm_{0,6} > Ge_{0,5} > Tl_{0,4} > Cd_{0,26} > Sb_{0,25} > Ce_{0,2} > Sn_{0,19} > Ga_{0,1} > Nd_{0,08} > Th_{0,04} > Bi_{0,03} > Ag_{0,025} > Lu_{0,019} > U_{0,014} > Gd_{0,013} > Tb_{0,007} > Yb_{0,0024} > In_{0,0023}.

ВВЕДЕНИЕ

Изучением подземных вод нефтегазоносных отложений Западно-Сибирского осадочного бассейна (ЗСОБ) длительное время занимались А.Э. Конторович, Б.П. Ставицкий, А.А. Розин, Н.М. Кругликов, В.В. Нелюбин, О.Н. Яковлев, В.М. Матусевич, А.А. Карцев, С.Л. Шварцев и многие другие исследователи [8, 10-11, 13-14, 17, 19]. Среди микроэлементов и соединений, при нефтегазопромысловых работах в водах традиционно изучали содержания I, Br, F, NH₄, реже Sr и нафтеновых кислот. Наиболее полные сведения о микроэлементном составе вод обобщены в работах А.Э. Конторовича, Р.Г. Прокопьевой, В.М. Матусевича и В.К. Попова [9, 12, 16].

В настоящей работе приводятся последние данные по изучению распределения более чем 60 элементов в подземных водах меловых и

юрских нефтегазоносных комплексов арктических районов ЗСОБ, а также обсуждению возможных источников их поступления в раствор. Изученная коллекция подземных вод представлена 124 пробами по 17 месторождениям (рис. 1а). Аналитические исследования выполнены в период 2018-2020 гг. в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии ИШПР ТПУ (аналитики О.В. Чеботарева, Н.В. Бублий, А.С. Погуца, В.В. Куровская, К.Б. Кривцова, Л.А. акул).

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОХИМИИ

Величина общей минерализации подземных вод в изучаемом регионе не превышает (г/дм³): 25,3 в апт-альб-сеноманском, 53,0 в неокосском и 63,3 в верхнеюрском комплексах. По составу доминируют воды Cl Na, Cl-HCO₃ Na и HCO₃-Cl Na типов (по С.А. Щукареву) [17, 19].

При этом каждая из водоносных толщ мезозоя характеризуется рядом гидрогеохимических особенностей, обусловленных палеогидрогеологической историей, последующими процессами метаморфизации состава подземных вод, а также вертикальной миграцией вод из палеозойского фундамента в осадочный чехол в районах отсутствия мощной вулканогенно-

осадочной толщи триаса. Пробы изученной коллекции весьма разнообразны (рис. 1б), что связано с их разным генезисом от пестрых по составу конденсатогенных вод (минерализация 0,2-1,0 г/дм³) до седиментогенных слабых рассолов Cl Na состава с величиной общей минерализации до 53,7 г/дм³.

Рис. 1. Местоположение изученных месторождений в арктических районах Западной Сибири (а) и диаграмма Пайпера состава подземных вод: 1 – месторождения нефти и газа: 1 – Новоогенное; 2 – Ванкорское; 3 – Лодочное; 4 – Тагульское; 5 – Северо-Уренгойское; 6 – Уренгойское; 7 – Береговое; 8 – Восточно-Таркосалинское; 9 – Северо-Айваседопуровское; 10 – Тарасовское; 11 – Южно-Тарасовское; 12 – Комсомольское; 13 – Барсуковское; 14 – Новопурпейское; 15 – Верхнепурпейское; 16 – Губкинское, 17 – Сысконсыньинское. Водоносные комплексы: 1 – апт-альб-сеноманский; 2 – неокомский; 3 – верхнеюрский

Изученные апт-альб-сеноманские воды преимущественно Cl Na состава с величиной общей минерализации от 0,6 до 22,9 г/дм³. Минерализация подземных вод Cl Na, Cl Na-Ca, Cl Ca-Na, Cl-HCO₃ Na, Cl-HCO₃ Na-Ca, Cl-HCO₃ Ca-Na, HCO₃-Cl Na и HCO₃-Cl Na-Ca типов неокомских резервуаров составляет от 0,2 до 23,8 г/дм³. Подземные воды верхнеюрских отложений представлены Cl Na, Cl Ca, Cl-HCO₃ Na-Ca, Cl-HCO₃ Ca, Cl-HCO₃ Ca-Mg и HCO₃ Ca и HCO₃ Ca-Na типами с величиной общей минерализации от 0,2 до 53,7 г/дм³. Во всех комплексах отмечается закономерное увеличение содержаний основных солеобразующих компонентов (Na, K, Mg, Ca, Cl) по мере роста величины минерализации, а также смене химических типов от HCO₃-Cl Na слабоминерализованных вод до Cl Na с минерализацией до 53,7 г/дм³.

МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ

В результате аналитических исследований, установлено, что в подземных водах изученных месторождений нефти и газа среди химических элементов и соединений наибольшим распро-

странением пользуются (до, мг/дм³): Ba (847,7), Sr (595,7), I (161,1), Br (97,4), Si (88,9), B (75,3), NH₄ (67,5), Fe (60,2) и Li (10,5).

Основными источниками поступления элементов в раствор выступают вмещающие горные породы и рассеянное органическое вещество при протекании процессов его метаморфизма. Установлено, что благодаря длительному времени взаимодействия в системе вода – порода (более 165 млн. лет) [15] в наиболее активных компонентах этой системы (водах и нефтях) отмечаются общие закономерности распределения элементов (рис. 2а). В сравнительном анализе также использовались данные по распределению элементов в морской воде [18], основной нефтематеринской толще (глинисто-кремнистых породах баженской свиты) [4-7] и смолисто-асфальтовых компонентах нефтей Западной Сибири [1-2].

В изученных водах усредненная последовательность элементов имеет следующий вид (мкг/дм³): для апт-альб-сеноманского комплекса – Cu_{391,3} > Zn_{325,1} > Ni_{192,9} > Se_{42,2} > Pb_{26,6} > Sn_{22,9} > Mo_{21,9} > Ga_{6,9} > As_{5,0} > Bi_{4,8} > Co_{2,6} > In_{2,2} > Sb_{1,97} > Eu_{1,96} > Ce_{1,52} > La_{0,84} > Nd_{0,74} > Ag_{0,72} >

Hg_{0,67} > Sm_{0,24} > Ge_{0,18} > Th_{0,15} > Gd_{0,13} > U_{0,12} > Tl_{0,107} > Cd_{0,107} > Yb_{0,029} > Tb_{0,020} > Lu_{0,008}; неокомского – Zn_{155,7} > Ni_{67,8} > Se_{40,5} > Cu_{38,6} > Ge_{28,2} > Pb_{11,9} > Mo_{5,6} > Co_{4,7} > As_{3,6} > Sn_{3,4} > Hg_{1,8} > Eu_{1,2} > Ag_{0,9} > Sb_{0,8} > Ga_{0,6} > Ce_{0,5} > La_{0,4} > Nd_{0,2} > Bi_{0,14} > Sm_{0,11} > Cd_{0,10} > In_{0,08} > Tl_{0,07} > Gd_{0,06} > Th_{0,06} > U_{0,038} > Yb_{0,028} > Tb_{0,019} > Lu_{0,017} и верхнеюрского – Zn_{345,9} > Ni_{65,9} > Se_{34,5} > Cu_{23,5} > Pb_{15,6} > Eu_{9,9} > Co_{3,8} > As_{2,2} > Hg_{1,7} > La_{0,94} > Mo_{0,93} > Sm_{0,6} > Ge_{0,5} > Tl_{0,4} > Cd_{0,26} > Sb_{0,25} >

Ce_{0,2} > Sn_{0,19} > Ga_{0,1} > Nd_{0,08} > Th_{0,04} > Bi_{0,03} > Ag_{0,025} > Lu_{0,019} > U_{0,014} > Gd_{0,013} > Tb_{0,007} > Yb_{0,0024} > In_{0,0023}. Усредненные данные по нефтям [1-2] показывают следующие содержания (г/т): Zn_{72,3} > Ni_{23,3} > Pb_{16,5} > Cu_{15,2} > Co_{10,1} > Ce_{0,087} > Hg_{0,084} > La_{0,074} > Ag_{0,065} > Mo_{0,058} > Cd_{0,047} > Nd_{0,044} > Bi_{0,029} > Ga_{0,014} > Sm_{0,007} > Th_{0,006} > Gd_{0,006} > U_{0,004} > Eu_{0,0028} > Yb_{0,002} > Tl_{0,0019} > Tb_{0,0007} > Lu_{0,0005}.

Рис. 2. Спектр распределения элементов в изученных подземных водах, морской воде, породах баженовской свиты и смолисто-асфальтеновых компонентах нефтей Западной Сибири (а), коэффициенты концентрации относительно кларка осадочного слоя литосферы (б) и степень концентрирования элементов относительно морских вод и пород баженовской свиты (в).

а-б) 1 – морская вода, 2 – глинисто-кремнистые породы баженовской свиты, 3 – смолисто-асфальтеновые компоненты нефтей; водоносные комплексы: 4 – апт-альб-сеноманский; 5 – неокомский; 6 – верхнеюрский.

в) коэффициенты концентрации элементов в водах относительно пород баженовской свиты: 7 – апт-альб-сеноманского, 8 – неокомского и 9 – верхнеюрского; относительно морских вод: 10 – апт-альб-сеноманского, 11 – неокомского и 12 – верхнеюрского водоносных комплексов

Для оценки степени концентрирования элементов в подземных водах нефтегазоносных отложений был рассчитан коэффициент концентрации, который отражает отношение содержаний элементов в воде к вмещающим породам или к кларку осадочного слоя литосферы [3]. Установлено, что практически не накапливаются в водах: апт-альб-сеноманского комплекса – La, Ce, Nd, Sm, Gd, Tb, Yb, Lu, Th и U; неокомского – Ga, La, Ce, Nd, Sm, Gd, Tb, Yb, Lu, Tl, Th и U; верхнеюрского – Ga, In, Sn, La, Ce, Nd, Gd, Tb, Yb, Lu, Th и U. По большинству элементов наблюдается схожий характер концентрирования (рис. 2б) как в подземных водах изученных водоносных комплексов, так и в смолисто-

асфальтеновых компонентах нефтей и что самое главное в глинисто-кремнистых породах баженовской свиты, где распределение элементов имеет вид (г/т): Zn_{988,0} > Ni_{336,7} > Co_{264,4} > Cu_{198,9} > As_{65,2} > Ce_{40,3} > Se_{34,7} > Mo_{30,3} > Cd_{22,8} > Nd_{21,4} > La_{18,8} > Pb_{15,7} > Ga₁₅ > Sb_{9,7} > Eu_{5,7} > Sm_{5,4} > Yb_{2,9} > Tl_{2,3} > Th_{1,9} > U_{1,5} > Ag_{1,44} > In_{1,42} > Gd_{1,39} > Tb_{0,94} > Ge_{0,9} > Bi_{0,83} > Sn_{0,77} > Lu_{0,46} > Hg_{0,2}.

Расчет коэффициентов концентрации относительно пород баженовской свиты во всех водоносных комплексах показал значения значительно меньше единицы (см. рис. 2в). Характер их распределения во многом схож с таковыми относительно кларка осадочного слоя. Макси-

мально концентрируются в водах Ge, Sn, Hg и Eu. Расчеты относительно морских вод, показали значения коэффициента концентрации меньше 1 в водах меловых комплексов у Cd, In и U, а в водах верхнеюрского комплекса у As, Mo, Ag, In, Sn, Sb, Th и U. Как ни странно, но практически по всему спектру наибольшая степень концентрирования элементов наблюдается в водах апт-альб-сеноманского комплекса, хотя он расположен значительно выше основной нефтематеринской толщи Западной Сибири – баженовской свиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя вышесказанное отметим, что новый этап в изучении микроэлементного состава подземных вод нефтегазоносных отложений Западной Сибири только начинается. Учитывая длительное время взаимодействия в системе вода – порода (более 165 млн. лет) в наиболее активных компонентах этой системы (водах и нефтях) отмечаются общие черты их распределения. Установленные закономерности, за исключением Ge, Ag, In, Sn, Sb, Eu, Gd, Hg, Th и U также отмечаются у основной нефтематеринской толщи – баженовской свиты. Приведенные материалы требуют значительного уточнения и дальнейших скрупулезных исследований всех составляющих системы вода – горная порода – нефть.

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-70074 «Ресурсы Арктики», РФФИ и Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научного проекта № 19-45-890005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Винокуров С.Ф., Готтих Р.П., Писоцкий Б.И. Особенности распределения лантаноидов в смолисто-асфальтеновых фракциях один из геохимических критериев источников микроэлементов в нефти // Геохимия, 2010, № 4, с. 377–389.
- 2 Готтих Р.П., Писоцкий Б.И., Журавлев Д.З. Геохимические особенности нефти различных регионов и возможный источник металлов в ней // Доклады Академии Наук, 2008, Т. 422, №1, с. 88-92.
- 3 Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры // Уральский геологический журнал. – 2010. – № 3 (75). – С.85-90.
- 4 Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г., Красавчиков В.О. Редкоземельные элементы в баженовской свите Западно-Сибирского морского бассейна // сфера, 2011, № 6, с. 38-54.
- 5 Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г. Уран, торий и калий в черных сланцах баженовской свиты

Западно-Сибирского морского бассейна // Литология и полезные ископаемые, 2016, № 1, с. 82-94.

- 6 Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г. Халькофильные элементы в черных сланцах баженовской свиты Западно-Сибирского морского бассейна // Геология и Геофизика, 2016, Т. 57, № 4, с. 771-778.
- 7 Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г. Никель, молибден, кобальт в черных сланцах баженовской свиты Западно-Сибирского морского бассейна // Геохимия, 2017, № 2, с. 161–170.
- 8 Карцев А.А., Вагин С.Б., Матусевич В.М. Гидрогеология нефтегазоносных бассейнов. М.: Недра, 1986, 224 с.
- 9 Конторович А.Э., Данилова В.П., Иванов В.П. Битумоиды и микроэлементы в подземных водах нефтегазоносных отложений юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Гидрогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых. Томск. – 1986. – С. 115-116
- 10 Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., и др. Геология нефти и газа Западной Сибири. М.: Недра, 1975, 680 с.
- 11 Кругликов Н.М., Нелюбин В.В., Яковлев О.Н. Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и особенности формирования залежей углеводородов. Л.: Недра, 1985, 279 с.
- 12 Матусевич В.М., Попов В.К. Микроэлементы в подземных водах – показатели нефтегазоносности // Известия ВУЗов. Нефть и газа, 1978, №8, С.3-8.
- 13 Матусевич В.М., Рыльков А.В., Ушатинский И.Н. Геофлюидальные системы и проблемы нефтегазоносности Западно-Сибирского мегабассейна. Тюмень: ТюмГНГУ, 2005, 225 с.
- 14 Назаров А.Д. Нефтегазовая гидрогеохимия юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. М.: Идея-Пресс, 2004, 288 с.
- 15 Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Ян П.А. Особенности латеральной гидрогеохимической и аутигенно-минералогической зональности оксфордского регионального резервуара Надым-Тазовского междуречья // Геология и геофизика. 2019, т. 60, № 6, с. 843-859.
- 16 Прокопьева Р.Г. Использование комплекса микроэлементов в качестве критерия нефтегазоносности объектов разведки // Труды ЗапСибНИГНИ, вып.120, 1977. – С.49-51.
- 17 Шварцев С.Л., Новиков Д.А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2004, т. 45, № 8, с. 1008-1020.
- 18 Horn D.R., Horn B., Delach M.N. Worldwide distribution and metal content of deep-sea manganese deposits; Manganese Nodule Deposits in the Pacific. Symp./Workshop Proc., Honolulu, Hawaii, October 16–17, 46–60, 1972.
- 19 Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development. 2017, v. 44, № 5, p. 780-788.