ФОРМИРОВАНИЕ, ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ВОЗРАСТ РАССОЛОВ ВОЛГО-УРАЛЬСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО БАСЕЙНА

В. Г. Попов, Р. Ф. Абдрахманов

Институт геологии Уфимского научного центра РАН, Уфа

popovvg@novoch.ru, hydro@ufaras.ru

Статья посвящена фундаментальной проблеме современной генетической гидрогеохимии и нефтегазовой гидрогеологии — выяснению природы и возраста рассолов, занимающих доминирующее положение в гидростратисфере эпикарельских платформ. На базе > 500 анализов макро- и микроэлементов выполнена геохимическая типизация рассолов Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна и изложены представления авторов по поводу их формирования и происхождения. Генезис хлоркальциевых рассолов связывается с процессами плотностной конвекции хлормagneйной маточной рапы из нижнепермского эвапоритового палеоводоёма в нижележащие комплексы палеозоя и последующей ее метаморфизации главным образом за счет метасоматической доломитизации известняков. Эпигенетический характер хлоркальциевых рассолов подтверждается гидрогеохронологическими оценками, выполненными кинетико-геохимическим методом. Интерпретация геохимико-генетической информации указывает на вероятное участие Урала в нефтегазоносности Волго-Уральского региона.

Ключевые слова: Волго-Уральский нефтегазоносный бассейн, рассолы, формирование, происхождение, возраст.

FORMATION, ORIGIN AND AGE OF BRINES FROM VOLGA-URAL OIL AND GAS BASIN

V. G. Popov, R. F. Abdrakhmanov

Institute of Geology, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences

The article is devoted to the fundamental problem of modern genetic hydrogeochemistry and petroleum hydrogeology — to clarify the nature and age of the brines dominating in hydrostratisphere of epi-Karelian platforms. On the basis of more than 500 analyzes of macro- and micronutrients we made a geochemical typification of Volga-Ural brines and presented our ideas about their formation and origin. The genesis of calcium chloride brines was associated with the processes of density convection of uterine magnesium chloride brine from the Lower Permian evaporite paleoreservoir into the underlying Paleozoic complexes and its subsequent metamorphism mainly due to the metasomatic dolomitization of limestones. The epigenetic character of calcium chloride brines was confirmed by hydrogeochronological estimates made by a kinetic-geochemical method. The interpretation of geochemical genetic information indicated a possible contribution of the Urals in the oil and gas potential of the Volga-Ural region.

Keywords: Volga-Ural oil and gas basin, brines, formation, origin, age.

Введение

Волго-Уральский нефтегазоносный бассейн (НГБ) — один из наиболее крупных среди седиментационных бассейнов древней эпикарельской Восточно-Европейской платформы. Кристаллический фундамент архея — ранне-го протерозоя залегает на глубинах от 1—2 км на сводовых поднятиях (Токмовском, Татарском, Жигулевско-Пугачевском и др.) до 5—8 км и более во впадинах (Верхнекамской, Соликамской, Бельской и др.). Основную роль в разрезе на большей части НГБ играет палеозойский структурный этаж, представленный главным образом карбонатными осадками средней мощностью 2.0—2.5 км. В соответствии с покровно-надвиговой концепцией строения Урала [5] платформенные формации палеозоя Предуральского прогиба прослеживаются далеко на восток в область Центрально-Уральского поднятия, где залегают под аллохтонными пакетами более древних, в том числе архей-протерозойских образований.

В палеозойском этаже выделяются до 7 нефтегазоносных комплексов (НГК), сложенных карбонатными и тер-

ригенными породами. Основными по запасам нефти являются терригенные НГК среднего-верхнего девона (I) и нижнего карбона (III). На территории Волго-Уральской антеклизы они вскрываются на глубинах соответственно 1.1—1.3 и 1.6—1.8 км, а в Предуральском прогибе — более 3 км (см. рисунок).

По вопросам о нефтепроизводящих породах и размещении зон нефтегазообразования мнения исследователей расходятся. Е. В. Лозин [3] считает, что нефтематеринским (базовым) является только I НГК. В нем в результате термokatалитических процессов *in situ* произошла генерация первичных (сингенетичных) битумоидов. Нефтегазовые скопления во всех вышележащих НГК признаны вторичными, образовавшимися за счет миграции УВ из базового I НГК, главным образом путем всплывания.

В работе [2] нефтегенерирующими признаются оба, I и III терригенные комплексы, но зоны образования и накопления нефти каждого из них территориально разобщены. Так, формирование крупнейших зон нефтенакпления в девоне (Ромашкинско-Шкаповской) и нижнем карбоне

Гидрогеохимический разрез Среднего Предуралья:

1—7 — состав и минерализация подземных вод (г/дм³): 1 — HCO₃-Ca-Mg, HCO₃-Ca-Na (< 1), 2 — SO₄-Ca, SO₄-Ca-Na (1—15), 3 — SO₄-Cl-Ca-Na (3—36), 4 — Cl-Na (36—320), 5 — Cl-Ca-Na (200—330); 6 — гидрогеохимическая граница; 7 — стратиграфическая граница; 8 — линия разлома; 9 — скважина. Цифры: слева — М (г/дм³), справа — концентрация Г (мг/дм³), сверху номер скважины и название нефтеразведочной площади; 10 — изолиния концентрации Br (г/дм³); 11 — геоизотерма

Hydrogeochemical section of Middle Pre-Ural areas:

1—7 — composition and mineralisation of groundwaters (g/dm³): 1 — HCO₃-Ca-Mg, HCO₃-Ca-Na (< 1), 2 — SO₄-Ca, SO₄-Ca-Na (1—15), 3 — SO₄-Cl-Ca-Na (3—36), 4 — Cl-Na (36—320), 5 — Cl-Ca-Na (200—330); 6 — hydrogeochemical boundary; 7 — stratigraphic boundary; 8 — fault line; 9 — borehole. Figures: left — M (g/dm³), right — Γ concentration (mg/dm³), up — borehole number and name of oil exploration site; 10 — isoline of Br concentration (g/dm³); 11 — geoisotherm

(Арлано-Дюртюлинской) связывается с дальней (> 250—300 км) латеральной миграцией УВ из юго-восточных районов платформы и Бельской впадины под действием однонаправленных сил всплывания и гидравлического напора с Урала. Как и в работе [3], допускается «подпитка» девонского НГК первичными УВ терригенного венда.

В этих и других концепциях сугубо «плитного» образования УВ, несмотря на их принципиальные различия, не учитываются возможности поступления УВ из недр складчато-надвигового пояса Урала. В любом случае подземные воды (включая литогенные и конденсатогенные растворы) и УВ в различных фазовых состояниях представляют собой единую пространственно и генетически взаимосвязанную газово-жидкую флюидную систему, вследствие чего играют важную (часто определяющую) роль в процессах генерации, миграции и аккумуляции УВ.

Геохимические типы рассолов

Рассолы Волго-Уральского НГБ представлены тремя основными геохимическими типами: 1) Cl-Na-Mg, Cl-Ca-Mg (минерализация М 340—420 г/дм³, плотность ρ 1.230—1.285 г/см³), связанными с кунгурской соленосной формацией и представляющими меж- и внутрисолевую маточную рапу эвапоритового палеоводоема, 2) Cl-Na (М 36—320 г/дм³, ρ 1.025—1.222 г/см³) инфильтрационно-диффу-

зионного выщелачивания галитовой фазы галогенеза, заключенными в надсолевых уфимских (соликамских), подсолевых ассельско-артинских и средневерхнекамменно-угольных преимущественно карбонатных отложениях и 3) Cl-Na-Ca, Cl-Ca-Na (М 200—330 г/дм³, ρ 1.140—1.226 г/см³) подсолевыми, образующими в глубокозалегающих терригенно-карбонатных комплексах нижнего карбона, девона и венда выдержанную геохимическую зону мощностью во впадинах фундамента до 5—7 км и более (см. рисунок).

Хлоркальциевым рассолам свойственны высокая метаморфизация (rNa/rCl 0.1—0.7, CaCl₂ до 52%), низкая сульфатность (rSO₄·100/rCl 0.02—0.7), обогащенность Br[−] (до 2.2 г/дм³), Sr²⁺ (до 1.2 г/дм³), Li⁺ (до 0.035 г/дм³), Rb⁺ (до 0.02 г/дм³), Cs⁺ (до 0.001 г/дм³), кислая реакция среды (рН 4—6), отрицательные значения Eh (до −300 мВ), N₂-CH₄-газовый состав. Концентрация I[−] обычно < 0.02 г/дм³. Коэффициент Cl/Br рассолов снижается до 160—75, а rMg/rCa — до 0.05*. Формирование этих своеобразных «жидких руд», с которыми ассоциируются наиболее крупные нефтегазовые месторождения Волго-Уральского бассейна и других НГБ древних платформ, является одной из наиболее важных и не менее дискуссионных проблем генетической гидрогеохимии и нефтяной гидрогеологии.

Состав выделенных геохимических типов рассолов иллюстрируется приведенными ниже формулами. Приме-

* Результаты 150 анализов различных геохимических типов рассолов и графики корреляции приведены в нашей работе [4].

ром не претерпевших эпигенетической метаморфизации во вмещающих породах Cl-Mg-рассолов служит межкристаллическая маточная рапа Илецкого месторождения кунгурских солей в Прикаспии:

$$N_2CH_4Br12.32M473 \frac{Cl97Br2SO_41}{Mg94(Na+K)6} \rho1.32 \frac{rNa}{rCl} 0.07 \frac{Cl}{Br} 26.8.$$

В эвапоритовых формациях среди солей встречаются известняки и галопелиты. Между ними и маточными Cl-Na-Mg-рассолами происходят ионообменные взаимодействия, ведущие к изменению состава как рассолов, так и пород [4]. Так, в Соликамской депрессии на Верхнекамском месторождении кунгурских солей в ходе реакций между Mg^{2+} и Na^+ жидкой фазы и Ca^{2+} пород образовались рассолы Cl-Ca-типа:

$$N_2CH_4Br17.47K24.5M419 \frac{Cl97Br3}{Mg58Ca25Na9K8} \rho1.29 \frac{rNa}{rCl} 0.09 \frac{Cl}{Br} 15.4.$$

Представителем «чистых» Cl-Na-рассолов являются рассолы надсолевых кунгурских известняков, установленные на глубине 939—971 м скважиной Денисовской нефтеразведочной площади Бельской депрессии:

$$H_2SN_2Br0.11K1.9M245 \frac{Cl97SO_43}{(Na+K)97Ca3} \rho1.16 \frac{rNa}{rCl} 1.0 \frac{Cl}{Br} 1261.$$

Обычно же в Cl-Na-рассолах вследствие смешения их с рассолами Cl-Ca-типа и литолого-гидрогеохимических взаимодействий содержание $CaCl_2$ достигает 10—15 %. Так, на Бакалинской площади Татарского свода в интервале 1203—1214 м (турне) оно составляет около 11 %:

$$N_2CH_4Br0.31I0.007K1.3M254 \frac{Cl100}{(Na+K)84Ca1Mg5} \rho1.17 \frac{rNa}{rCl} 0.84 \frac{Cl}{Br} 595.$$

Наиболее метаморфизованные Cl-Na-Ca-рассолы ($CaCl_2$ — 50 %) установлены в терригенных отложениях девона на Пермско-Башкирском своде. На Байкибашевской площади в интервале 1786—1791 м рассолы имеют следующий состав:

$$N_2CH_4Br2.1I0.005M291 \frac{Cl100}{Ca52(Na+K)43Mg5} \rho1.19 \frac{rNa}{rCl} 0.43 \frac{Cl}{Br} 86.9.$$

Формирование хлоркальциевых рассолов

Главная роль в формировании литолого-геохимического состояния гидростратисферы Волго-Уральского НГБ принадлежит раннепермской эпохе. В это время на востоке Русской плиты возникла и длительно существовала гравитационно неустойчивая в поле силы тяжести Земли гидрогеодинамическая система, энергетическое состояние которой определялось градиентом плотности воды поверхностной и подземной гидросфер. Поверхностная часть системы была представлена эвапоритовым бассейном с крепкими (М до 400—500 г/дм³), тяжелыми (ρ_1 до 1.30—1.37 г/см³) Cl-Na-Mg-рассолами, а подземная — в основном карбонатными породами с более слабыми (М 30—150 г/дм³) и легкими (ρ_2 1.02—1.13 г/см³) Cl-Na-рассолами.

При коэффициенте фильтрации в вертикальном направлении карбонатных осадков 10^{-4} м/сут, их пористости 0.05, $\Delta\rho$ 0.08 скорость плотностной конвекции составит ~ 5 см/год. Это значит, что подсолевая толща мощностью 4000 м будет заполнена рассолами солеродного бассейна за 80 тыс. лет. Количество маточной рапы только в кунгурском палеобассейне с избытком хватает для насыщения подсолевых комплексов палеозоя и протерозоя [4].

Важно подчеркнуть, что процессы плотностной конвекции не носили разовый характер, а протекали с перерывами на протяжении всей нижнепермской эпохи, т. е.

миллионы лет. Интенсивность их была различной в связи с непостоянством гидрохимического режима ассельско-кунгурского лагунно-морского палеоводоёма. Тем не менее, учитывая целый ряд факторов (в т. ч. тенденцию роста М и ρ во времени), следует полагать, что подсолевая толща претерпела многократное воздействие гравитационно-рассольного водообмена. При этом ранее заключенные в ней формационные воды неизбежно должны были вытеснены в солеродный бассейн и участвовать в галогенезе. Вместе с тем подвижные сульфатсодержащие солеродные рассолы, несущие химически связанный кислород, не могли не вызвать механическую и химическую деструкцию ранее образовавшихся УВ-скоплений.

Погружение из солеродного бассейна Cl-Na-Mg-рассолов сопровождалось их метаморфизацией при взаимодействии с породами и изменением состава пород за счет инконгруэнтных абсорбционных процессов. Из них главная роль принадлежит эпигенетической доломитизации известняков, ведущей к образованию Cl-Na-Ca-рассолов: $2CaCO_3$ (известняк) + $MgCl_2$ (рассол) = $CaCO_3 \times MgCO_3$ (доломит) + $CaCl_2$ (рассол).

Суммарная мощность доломитизированных известняков (Mg^{2+} до 10 %) в разных частях НГБ изменяется от 160 до 400 м, что составляет 20—30 % от общей мощности палеозойской толщи. Литолого-фациальный анализ карбонатных толщ и балансовые расчеты в системе «Cl-Ca-рассол — эпигенетический доломит» показали соответствие масс Ca^{2+} в жидкой и Mg^{2+} в твердой фазах. Следовательно, количества Ca^{2+} , поступающего из $CaCO_3$ при метасоматических процессах, достаточно для образования рассолов Cl-Ca-типа в осадочном чехле Волго-Уральского НГБ. Что касается гидролитических и обменно-адсорбционных процессов, то они в связи с ограниченным развитием терригенных пород в палеозое и крайне низкими ионообменными свойствами не играют существенной роли в формировании Cl-Ca-рассолов [4].

Абсолютный возраст и генезис рассолов

Гидрогеохронологические оценки выполнены кинетико-геохимическим методом [6] по данным > 500 химических анализов проб рассолов. Расчетная формула имеет следующий вид:

$$\tau_\theta = A_\theta \times \frac{lg M \times \epsilon_\tau \times lg \frac{30}{\theta} \times 10^{1000/T}}{\epsilon_\rho},$$

где τ_θ — возраст рассолов, млн лет; A_θ — поправочный коэффициент, величина которого зависит от пластовой T ; М — минерализация рассолов, г/дм³; ϵ_θ и ϵ_ρ — экспоненциальные геохронотерма и хронобарический градиент (комплексные параметры, учитывающие РТ-историю НГК).

Главный параметр, ответственный за возраст рассолов, — катионный коэффициент $\theta = (rNa+rMg)/rCa$. Он отражает степень метаморфизации рассолов, которая вследствие внутридиффузионной кинетики абсорбционных процессов является функцией геологического времени. Рассмотрим полученные результаты.

Для рассолов вендского комплекса величина τ_θ составляет 234—330 млн лет ($\theta = 1.1—2.2$) при возрасте вмещающих пород > 570 млн лет, что может быть объяснено влиянием вод вышележащих НГК.

Рассолы девона — нижнего карбона чаще всего имеют возраст, близкий к раннепермскому ($\tau_\theta = 200—250$ млн лет). Однако в связи с флуктуирующими М (147...310 г/дм³) и θ (0.9...6.7) τ_θ изменяется от десятков до 340 млн лет. Причем

наиболее «молодые» рассолы с большой (до 50–80 %) долей инфильтрационных вод тяготеют к Токмовскому и Камскому сводам, встречаются в Предуральском прогибе, а «древние» — к южным вершинам Пермско-Башкирского, Татарского сводов и другим структурам.

Вверх по разрезу палеозоя возраст рассолов закономерно снижается. Если в терригенном нижнекаменноугольном НГК он достигает 160–215 млн лет, то в карбонатном нижнесреднекаменноугольном (визейско-башкирском) и терригенно-карбонатном среднекаменноугольном (верейском) обычно < 140–60 млн лет, а в карбонатном среднекаменноугольно-нижнепермском < 50 млн лет. В этих смешанных по происхождению рассолах количество инфильтрационных вод растёт от 10–20 % на глубинах 1.3–2.1 км до 80–90 % на 0.5–1.0 км.

Абсолютный возраст меж- и внутрисолевых Cl–Ca–Mg–рассолов, заведомо сингенетичных вмещающим их кунгурским солям, составляет 160–240 млн лет.

Приведенные данные определенно указывают на эпигенетическую природу Cl–Ca–рассолов Волго-Уральского бассейна и преимущественно вторичный характер залежей нефти и газа в терригенных и карбонатных коллекторах палеозоя. Заполнение платформенных ловушек, расположенных на пути латеральной миграции УВ, произошло, вероятнее всего, в неотектонический (N_2 -Q) этап развития региона. В соответствии с покровно-надвиговым стилем тектоники Урала платформенные комплексы палеозоя на границе с ним не выклиниваются, а продолжают к востоку на расстояние 20–60 км и более под аллохтонными тектоническими пластинами [5]. Наличие в субплатформенном палеозое орогена потенциально газогенерирующих пород (афонинский горизонт среднего девона и др.), УВ газовых скоплений (CH_4 + гомологи 89.6–100 %) и талассогенных метаморфизованных рассолов ($CaCl_2$ 18.5–54.5 %) в Зилаирском синклинии [1], газопроявлений в зоне сочленения Юрюзано-Сылвенской депрессии с Уфимским амфитеатром предопределяют миграцию УВ с Урала в Предуральский прогиб.

Процессы УВ-дегазации глубоких недр орогена, судя по всему, продолжаются и в современную эпоху, на что указывает присутствие в верхнедевонско-турнейском НГК (1.9–2.4 км) предгорной зоны Соликамской депрессии конденсатогенных вод, не уничтоженных процессами диффузионного обмена веществом с пластовыми рассолами и породами. С ними ассоциируются молодые и, надо полагать, восполняемые газоконденсатные и газонефтяные залежи [4]. Это подтверждается также результатами исследования физико-химических свойств нефтей [7], локализацией во внутренней зоне Предуральского прогиба газовых, нефтегазовых и газоконденсатных месторождений (Беркутовское, Исимовское, Саратовское в Бельской депрессии, Апутовское в Юрюзано-Сылвенской, Маговское, Цепельское в Соликамской и др.). Залежи УВ обнаружены также в пределах Западно-Уральской внешней зоны складчатости (Ветосская, Исаневская, Сурсайская и др.).

Выводы

Доминирующие в гидростратисфере Волго-Уральского НГБ Cl–Ca–рассолы генетически связаны с процессами плотностной конвекции Cl–Na–Mg–маточной рапы из нижнепермского эвапоритового палеоводоёма в подстилающие толщи палеозоя и позднего протерозоя. Конвективное погружение солеродных рассолов в терригенно-карбонатную среду сопровождалось их метаморфизацией за счет обмен-

но-абсорбционных процессов, в которых главная роль принадлежит метасоматической доломитизации известняков. Эпигенетический характер Cl–Ca–рассолов подтверждается гидрогеохронологическими оценками, полученными кинетико-геохимическим методом. Оказалось, что в основной своей массе они имеют раннепермский возраст.

Результаты выполненных литолого-геохимических исследований свидетельствуют о послепермском образовании скоплений УВ в Предуральском прогибе и сопредельной части Волго-Уральской антеклизы. Они могут быть истолкованы в пользу участия в формировании нефтегазового потенциала Предуралья УВ уральского происхождения, миграция которых произошла из глубокопогруженных автохтонных субплатформенных формаций палеозоя в неотектонический (N_2 -Q) этап развития орогена.

Литература

1. Абдрахманов Р. Ф., Попов В. Г. Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала. Уфа: Гилем, 2010. 420 с.
2. Гидрогеологические условия формирования и размещения нефтяных и газовых месторождений Волго-Уральской области / М. И. Зайдельсон, А. И. Чистовский, Е. А. Барс и др. М.: Недра, 1973. 280 с.
3. Лозин Е. В. Глубинное строение и нефтегазонасность Волго-Уральской области и смежных территорий // Литосфера. 2002. № 3. С. 46–68.
4. Попов В. Г., Носарева С. П. Геохимическая зональность и происхождение рассолов Предуралья. Уфа: Гилем, 2009. 272 с.
5. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
6. Резников А. Н. Определение возраста рассолов и солевых вод кинетико-геохимическим методом // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 1. С. 120–129.
7. Фрик М. Г. Закономерности распределения биомаркеров в нефтях и нефтематеринских породах. М.: Геоинформмарк, 1995. Вып. 4. 42 с.

References

1. Abdrakhmanov R.F., Popov V.G. *Geokhimiya i formirovanie podzemnykh vod Yuzhnogo Urala* (Geochemistry and formation of groundwaters of South Urals). Ufa, Gilem, 2010. 420 pp.
2. *Gidrogeologicheskie usloviya formirovaniya i razmescheniya neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii Volgo-Uralskoi oblasti* (Hydrogeological conditions of formation and distribution of oil and gas deposits in Volga-Ural area). M.I. Zaidelson, A.I. Chistovskii, E.A. Bars et al. Moscow, Nedra, 1973, 280 pp.
3. Lozin E.V. *Glubinnoe stroenie i neftegazonosnost Volgo-Uralskoi oblasti i smezhnykh territorii* (Deep structure and oil-gas potential of Volga-Ural region and adjacent areas). Litosfera, 2002, No. 3, pp. 46–68.
4. Popov V.G., Nosareva S.P. *Geokhimicheskaya zonalnost' i proishozhdenie rassolov Preduralya* (geochemical zonalinity and genesis of Ural brines). Ufa, Gilem, 2009, 272 pp.
5. Puchkov V.N. *Geologiya Urala i Priuralya (aktualnye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* (Geology of Urals and Pre-ural areas (modern issues of stratigraphy, tectonics and metallogeny)). Ufa, DizainPoligrafServis, 2010, 280 pp.
6. Reznikov A.N. *Opredelenie vozrasta rassolov i solenyykh vod kinetiko-geokhimicheskim metodom* (Determination of age of brines and salt waters by a kinetic-geochemical method). Izv. AN SSSR, Geology, 1989, No. 1, pp. 120–129.
7. Frik M.G. *Zakonomernosti raspredeleniya inomarkerov v neftyakh i neftematerinskiykh porodakh* (Regularities of distribution of markers in oils and source rocks). A.O. Geoinformmark, 4, Moscow, 1995, 42 pp.