

УДК 552.578

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ СКОПЛЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

© 2004 г. А. А. Баренбаум

Представлено академиком А.Н. Дмитриевским 21.05.2004 г.

Поступило 31.05.2004 г.

Образование скоплений нефти и газа – актуальная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение. Последнее столетие стратегическим путем ее решения являлся поиск источника углеводородов (УВ), формирующего нефтегазовые залежи. К настоящему времени сложились две основных точки зрения на данную проблему. Согласно “органической” теории нефть и газ имеют биогенную природу и образуются из остатков отмерших живых организмов, погружающихся в ходе геологических процессов в глубь земной коры. В соответствии с “минеральной” теорией нефть и газ возникают abiогенным образом вследствие каталитического синтеза углеводородов в глубоких земных недрах. На протяжении второй половины XX в. между сторонниками разных концепций шли непримиримые дискуссии.

В последние годы накоплены факты, выявившие ограниченность такого подхода к решению проблемы. Во-первых, это многочисленные примеры [1] высокого темпа (за 10–50 лет) пополнения запасов нефти и газа в процессе эксплуатации месторождений, не совместимые с органической теорией, согласно которой для формирования залежей УВ требуется время порядка 10^6 лет и более. Во-вторых, быстрая и сильная вариация состава поступающих из недр углеродсодержащих газов [2], трудно объяснимая с позиций минеральной теории их abiогенным синтезом на больших глубинах. И в-третьих, наличие в нефтях радиоактивного нуклида ^{14}C , как естественного [3], так и техногенного [4] происхождения, присутствие которого не укладывается ни в одну из этих концепций.

Эти факты свидетельствуют, что образование месторождений нефти и газа определяется не только генезисом УВ, но и иными не менее важными причинами и факторами. В качестве такого фактора всегда указывалось на возможность переноса углерода водами (флюидами) в геологические структуры-ловушки. Органики широко привлекали данный процесс для доставки УВ в ло-

вушки из “нефтематеринских” пород [5, 6], а неорганики для поставки УВ в те же ловушки из “каналов дегазации” [1]. При этом сторонники обеих концепций ограничивались рассмотрением в основном лишь циркуляции подземных флюидов.

Перенос углерода через земную поверхность наземными водами до недавнего времени оставался слабо изученным вопросом, и в процессах нефтегазообразования ему не придавалось должного значения. Исследования последних лет, однако, показали [7], что масштабы и скорости этого переноса в ходе современного круговорота воды на Земле столь велики, что полностью разрешают проблему происхождения скоплений нефти и газа, по крайней мере, на континентах.

В процессе круговорота подвижный углерод многократно пересекает поверхность Земли. Входя в состав живых организмов и минеральных агрегатов, он часто меняет химическую форму и изотопный состав. Над земной поверхностью, играющей роль “геохимического барьера”, углерод циркулирует преимущественно в окисленном виде (CO_2), а под ней в восстановленном (CH_4). В силу низкой растворимости в воде УВ в земной коре выделяются в отдельную фазу, которая, заполняя ловушки-коллекторы, формирует нефтегазовые скопления. Будут ли залежи представлены нефтью или газом, зависит от типа ловушек и термобарических условий накопления в них УВ. В случае хорошей изоляции покрывки главным образом накапливается газ, а при худших ее изоляционных свойствах – нефть.

Таким образом, предполагаемый механизм образования скоплений нефти и газа базируется на трех положениях: 1) важной роли климатического круговорота воды в переносе углерода в подземные коллекторы; 2) восстановлении окисленных форм углерода в земной коре до УВ с выделением последних в свободную фазу; 3) физико-химическим преобразованием УВ и накоплении их в ловушках в виде нефти и газа.

Обоснуем участие в нефтегазообразовании каждого из этих процессов.

1. В 30-е годы прошлого века В.И. Вернадский [8] пришел к выводу, что на нашей планете происходит глобальный геохимический круговорот вещества, в котором очень активное участие прини-

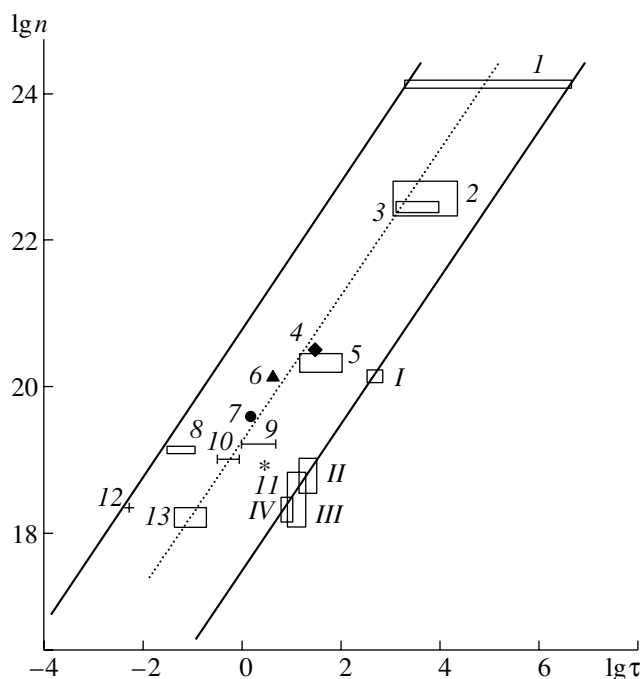


Рис. 1. Сопоставление количества воды (n) и времени водообмена (τ) для основных природных резервуаров Земли [7]. I – Мировой океан; 2 – подземные воды; 3 – ледники и ледниковые покровы; 4 – озера, водохранилища и болота; 5 – озера; 6 – болота; 7 – морские льды; 8 – вода в атмосфере; 9 – почвенная влага; 10 – снежный покров; 11 – айсберги; 12 – атмосферные льды; 13 – реки. I–IV – круговорот CO_2 в биосфере: I – Мировой океан, II – живое вещество, III – почвы–илы, IV – атмосфера. Прямоугольниками показан разброс оценок n и τ по литературным данным.

мает биота. Дальнейшие исследования показали, что этим явлением главным образом охвачены циклы кислорода, углерода и воды, которые образуют единую динамически устойчивую геохимическую систему круговорота [7]. Объединяющим началом такой системы выступает живое вещество, которое, участвуя во всех трех круговоротах, приводит скорости геохимической циркуляции диоксида углерода в биосфере и кислорода в атмосфере в равновесие со скоростью движения вод подземной гидросферы.

На рис. 1 с учетом современного массопереноса вод над и под поверхностью Земли [9, 10] выделены два их наиболее активных цикла. Один надземный – климатический (верхняя прямая) со скоростью $5.2 \cdot 10^{20}$ г/год, второй – подземный (нижняя прямая) со скоростью $(2.7 \pm 0.1) \cdot 10^{17}$ г/год, как и у круговорота диоксида углерода CO_2 в биосфере [7]. Все основные природные резервуары вод располагаются между этими линиями вдоль одной прямой, обнаруживая скорость полного водообмена $(2.0 \pm 0.5) \cdot 10^{19}$ г/год.

Такой характер расположения эмпирических данных позволяет сделать вывод [7], что водоемы континентов пополняются из двух разных источников: на $\sim 90\%$ они питаются “метеогенными” водами, участвующими в климатическом круговороте, и на $\sim 10\%$ так называемыми морскими водами. Первые – это воды регионального происхождения и интенсивного водообмена. Формируясь в атмосфере, они в виде дождя и снега выпадают на земную поверхность. Проникая в породы земной коры, они затем поступают в области питания водоемов. Вторые – воды пассивного водообмена и более глубокого залегания. Эти воды, вероятно, образуют единое целое с водами подземной гидросферы и Мирового океана. Анализ изотопии водорода и кислорода подземных флюидов в целом подтверждает указанное соотношение метеогенных и морских вод в осадочном чехле земной коры вплоть до глубин нескольких километров [11].

Произведем простой расчет. Примем во внимание, что среднее содержание углерода (во всех его формах) в метеогенных водах порядка 10 мг/л, а сами они проникают в земную кору до глубин ~ 10 км [10]. Тогда метеогенная вода может переносить через поверхность Земли массу углерода $0.9 \cdot 5.2 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-5} = 5 \cdot 10^{15}$ г/год. При этом масса той части подземной гидросферы, которая непосредственно обменивается водами с поверхностью на континентах, составляет $\sim 10^{21}$ г, а время их полного водообмена не превышает 100 лет. Такое же время на континентах занимает цикл геохимического круговорота углерода (см. рис. 1).

Данный расчет хорошо объясняет известный парадокс баланса углерода [12], заключающийся в том, что количество углерода, ежегодно отлагающегося в породах земной коры, составляет $(6 \pm 2.5) \cdot 10^{14}$ г/год, тогда как в обратном направлении, из земной коры в атмосферу, его поступает $(3 \pm 2) \cdot 10^{15}$ г/год. Этот дисбаланс вызван тем [7], что в осадочных породах остается лишь $\sim 10\%$ углерода, пересекающего земную поверхность на нисходящей ветви круговорота, а $\sim 90\%$ его никак не учитывается. Прокачиваясь с метеогенными водами под поверхностью Земли, этот углерод обнаруживает себя на восходящей ветви круговорота.

Имеется и другой парадокс баланса углерода, нуждающийся в объяснении. Он состоит в том, что в породах отлагается окисленный углерод ($\sim 2/3$ карбонатного и $\sim 1/3$ биогенного происхождения), а из них в основном дегазирует метан (CH_4) [12]. Данный факт явно указывает на то, что в земной коре происходит быстрое и эффективное восстановление окисленного углерода.

2. Известно [13], что в составе нефтей имеются УВ разного генезиса: 1) биомаркеры, возникающие исключительно в результате разложения

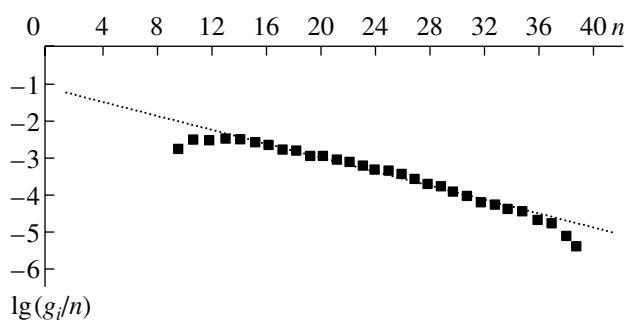


Рис. 2. Молекулярно-массовое распределение нормальных парафинов тенгизской нефти в системе координат уравнения Шульца [14].

тканей отмерших организмов или вследствие деятельности подземных бактерий; 2) углеводороды, легко образующиеся в реакциях абиогенного синтеза; 3) получаемые как первым, так и вторым способами. При этом доля биомаркеров составляет первые проценты.

Возможность синтеза УВ из окисленных форм углерода с участием воды и водорода, часто присутствующего в подземных газах, давно установлена эмпирически. Этот процесс может происходить вследствие многих экзотермических каталитических реакций. Однако наиболее важную роль из них, вероятно, играют две [14]: $n\text{CO} + (2n + 1)\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2} + n\text{H}_2\text{O}$ (синтез Фишера–Тропша) и $(3n + 1)\text{CO} + (n + 1)\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2} + (2n + 1)\text{CO}_2$

(синтез Кельбеля–Энгельгарда), характеризующиеся высокой каталитической активностью и большим тепловыделением.

На рис. 2 в качестве примера показано молекулярно-массовое распределение [14] нормальных парафинов нефти, представленное в системе координат уравнения Шульца: $\lg(g_n/n) = n \lg \alpha + \lg(\ln^2 \alpha)$, где g_n – массовая доля нормальных парафинов $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ с числом углеродных атомов n , α – параметр молекулярно-массового распределения. Данный график служит веским аргументом синтеза парафинов в указанных каталитических реакциях. При этом величина параметра $\alpha = 0.77 \pm 0.01$ может свидетельствовать об участии в этих реакциях катализаторов из оксидов железа и алюмосиликатов [14]. Если бы парафины возникли вследствие фоссилизации органики или в результате жизнедеятельности подземных нефтесинтезирующих бактерий [5, 6], распределение алканов вряд ли было бы таким.

3. Рассмотрим теперь вопрос о физико-химических преобразованиях УВ в условиях естественного залегания. Известно, что 95% всех разведанных запасов нефти и газа сосредоточены на глубине до 6 км [6]. В земной коре этим глубинам соответствует область термобарических условий, при которых происходит распад природных смесей УВ на отдельные фазы [15].

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты расчета фазовой P T -диаграммы смеси УВ ти-

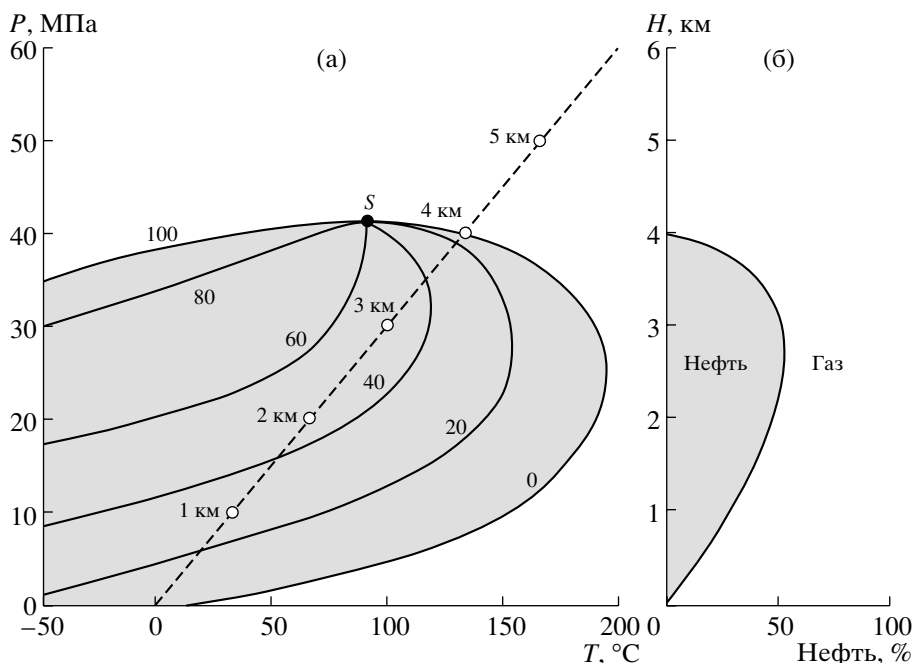


Рис. 3. Фазовая диаграмма углеводородной смеси (а) и соответствующая этой диаграмме кривая нефтенасыщения (б) [7]. Изоплерами показан процент жидкой фазы в исходной смеси углеводородов. Наклонная штриховая прямая с цифрами – шкала глубин (км) для наиболее типичного геотермического градиента; S – критическая точка смеси.

пичного газоконденсатного состава: CH_4 (70–85%), $\text{C}_2\text{H}_6\text{--C}_4\text{H}_{10}$ (5–10%), C^{5+} (10%). Согласно расчетам эта смесь может существовать в гомогенном состоянии лишь с внешней стороны двухфазной области (см. рис. 3а). Внутри этой области смесь распадается на две фазы: газообразную – газ и жидкую – нефть. Изоплерами обозначено процентное содержание жидкой фазы в смеси. Прямая линия отвечает изменению термобарических условий с глубиной.

Точки пересечения прямой с изоплерами (см. рис. 3б) определяют конфигурацию “главной зоны нефтеобразования (ГЗН)” [6]. Ниже этой зоны УВ представлены газом либо газоконденсатом. А еще ниже флюид ведет себя как единая водоуглеродная смесь и на фазы не разделяется. Вариации состава УВ деформируют ГЗН и сдвигают ее по глубине, но не меняют наших выводов [7].

Таким образом, имеются все основания полагать, что нефтегазовые месторождения представляют собой побочные продукты современного круговорота углерода через земную поверхность. На 90–95% они возникают при поступлении на глубину ~1–10 км метеогенных вод и на 6–10% за счет фоссилизации в земной коре органических остатков. Вовлечением в круговорот углерода из низов земной коры–верхов мантии сегодня можно пренебречь. Хотя в определенные эпохи прошлого Земли этот процесс явно доминировал [7].

Метеогенные воды несут $\sim 10^{-5}$ г/л углерода, что достаточно для разрешения проблем его баланса, а также пополнения запасов нефтегазовых залежей. Благодаря преимущественно региональному характеру климатического круговорота заполнение ловушек УВ происходит за время, исчисляемое лишь десятками–сотнями лет. При этом сами ловушки, во-первых, размещаются в пределах крупных осадочных бассейнов, дренирующих огромные по площади территории, и, во-вторых, тяготеют к разломам земной коры. Наличие разломов, с одной стороны, облегчает проникновение метеогенных вод в породы земной коры, а с другой – способствует разгрузке этих вод от транспортируемого ими углерода.

Если бы нефтегазовые месторождения возникали лишь в ходе геологических процессов, то формирование залежей УВ занимало миллионы–десятки миллионов лет, и заметить рост извлекаемых запасов месторождений за два–три десятка

лет, как это имеет место на практике, было бы невозможно. Напротив, сам факт увеличения этих запасов, а также обнаружение в нефтях короткоживущих космогенных изотопов говорит о том, что залежи нефти и газа, как и внутренние моря, реки, озера, ледники и другие скопления воды на континентах, контролируются одними и теми же региональными природными процессами, обусловленными климатическим круговоротом воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ / Под ред. Дмитриевского А.Н., Валяева Б.М. М.: ГЕОС, 2002. 472 с.
2. Войтов Г.И., Аббдувалиев А.К., Аммосов С.И. и др. // ДАН. 1990. Т. 313. № 5. С. 1085–1089.
3. Peter J.M., Peltonen P., Scott S.D. et al. // *Geology*. 1991. V. 19. P. 253–256.
4. Kalmytkov St.N., Sapozhnikov Yu.A., Golubov B.N. // *Czech. J. Phys.* 1999. V. 49. Suppl. 1. P. 91–95.
5. Альтовский М.Е., Быкова Е.Л., Кузнецова З.И., Швеиц В.М. Органические вещества и микрофлора подземных вод и их значение в процессах нефтегазообразования. М.: Гостоптехиздат, 1962. 295 с.
6. Конторович А.Э. Очерки теории нефтидогенеза. Избранные статьи. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 545 с.
7. Баренбаум А.А. Галактика, Солнечная система, Земля. Соподчиненные процессы и эволюция. М.: Геос, 2002. 393 с.
8. Вернадский В.И. Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 420 с.
9. Зверев В.П. Массопотоки подземной гидросферы. М.: Наука, 1999. 97 с.
10. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология / Под ред. Пиннекера Е.В. Новосибирск: Наука, 1980. 225 с.
11. Ферронский В.И., Поляков В.А., Романов В.В. Космогенные изотопы гидросферы. М.: Наука, 1984. 268 с.
12. Войтов Г.И. // *ЖРХО*. 1986. Т. 31. № 5. С. 533–539.
13. Петров Ал.А. Углеводороды нефти. М.: Недра, 1984. 264 с.
14. Глебов Л.С. // *Нефтехимия*. 2002. Т. 42. № 2. С. 92–94.
15. Баталин О.Ю., Брусиловский А.И., Захаров М.Ю. Фазовые равновесия в системах природных углеводородов. М.: Недра, 1992. 272 с.