

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ МИГРАЦИИ ГАЗА И ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Развита гипотеза, согласно которой формирование газовых залежей происходит путем миграции газа в растворенном в воде виде. Вода, переносящая газ, циркулирует в массиве вмещающих пород за счет неравномерного нагрева последних: более горячие слои газонасыщенного раствора поднимаются вверх, более холодные опускаются вниз. Под действием восходящих градиентов газонасыщенная вода, поднимающаяся с больших глубин, освобождает часть растворенного в ней газа и питает, таким образом, попутные ловушки. Выполнено математическое моделирование этого процесса. Показано, что вблизи мест резкого утончения земной коры гидротермальная циркуляция стимулирует вынос газа в приповерхностные слои Земли, его высвобождение из раствора и накопление. Практическое значение полученного результата состоит в том, что области, находящиеся вблизи границ палеоморей, весьма перспективны для поиска новых газовых месторождений.

Исходные предпосылки

1. Вмещающие породы насыщены водой на большую глубину.
2. Вода, или точнее флюид, заполняющий вмещающие породы, представляет собой многокомпонентный минерализованный раствор, насыщенный, в том числе углеводородами (метаном и его гомологами).
3. Под воздействием тепла Земли, вмещающие породы и содержащиеся в них растворы нагреты неравномерно.
4. Неравномерный нагрев вызывает фильтрационную конвекцию флюида из-за разности плотностей горячих и холодных слоев жидкости.
5. В каждой точке вмещающих пород устанавливается локальное термодинамическое равновесие между углеводородами, насыщающими флюид и породы.
6. Химический состав флюида определяется равновесным химическим составом углеводородов для данных давления и температуры.
7. При движении флюида происходит обмен углеводородами между флюидом и породами, обусловленный процессами, восстанавливающими термодинамическое равновесие между фазами.
8. Циркуляция флюида переносит компоненты природного газа из одной точки пространства в другую. Если при этом создаются условия выделения таких компонент из флюида, то при наличии ловушки (структуры с непроницаемой кровлей), они могут накапливаться с образованием газовой залежи.

Большая часть перечисленных предпосылок использовалась ведущими геологами [1, 3, 8, 12]. Однако представленные в виде системы гипотез, лежащих в основе математического моделирования, эти положения сформулированы впервые в работах авторов [4—7].

Растворимость метана и его гомологов в воде при различных давлениях и температурах

Известно, что метан и его гомологи (этан, бутан, пропан, пентан и др.) растворимы в воде. При этом растворимость метана в воде быстро увеличивается при увеличении давления. Для пресной воды она повышается от 0,7 м³/м³ при давлении 3,5 МПа до 5,0 м³/м³ при давлении 70 МПа. Растворимость метана и его гомологов зависит также от температуры. Например, при температуре 40 °С растворимость метана в воде снижается примерно в 6 раз, а этана в 2 раза, если давление уменьшается от 25 до 2,5 МПа [11].

Растворимость метана (90—95 % природного газа) в воде при различных давлениях и температурах представлена в табл. 1. При давлениях 20—30 МПа и температурах 120—160 °С, характерных для условий созревания природного газа, в 1 м³ воды может быть растворено от 3,5 до 4,5 м³ метана.

В табл. 2 приведены данные о растворимости этана (4—6 % природного газа) при различных давлениях и температурах [11]. При давлениях 20—30 МПа и температурах 120—160 °С в 1 м³ воды может быть растворено ≈ 2,5 м³ этана.

Таблица 1

Растворимость метана в воде (м³/м³) [10]

Давление, МПа	Температура, °С							
	20	40	60	80	100	120	140	160
2,5	0,75	0,60	0,49	0,45	0,43	0,46	0,52	0,65
5,0	1,50	1,10	0,93	0,86	0,84	0,89	1,06	1,24
10,0	2,43	1,95	1,70	1,57	1,58	1,69	1,94	2,39
15,0	3,15	2,55	2,26	2,12	2,15	2,37	2,73	3,45
20,0	3,78	3,05	2,75	2,63	2,71	2,96	3,41	4,40
25,0	4,20	3,47	3,13	2,99	3,14	3,47	3,95	4,77
30,0	—	3,86	3,49	3,39	3,58	3,96	4,51	5,42

Примечание. Прочерк — нет данных; объем газа приведен в м³ при давлении 0,1013 МПа и температуре 273,15 К.

Таблица 2

Растворимость этана в воде ($\text{м}^3/\text{м}^3$) [10]

Давление, МПа	Температура, °С							
	20	40	60	80	100	120	140	160
2,5	0,85	0,65	0,49	0,39	0,37	0,42	0,50	0,56
5,0	1,20	0,87	0,75	0,69	0,69	0,77	0,89	1,04
10,0	1,45	1,00	0,93	0,92	0,99	1,15	1,38	1,64
15,0	1,55	1,06	1,01	1,06	1,20	1,39	1,64	2,05
20,0	1,62	1,13	1,08	1,13	1,31	1,54	1,85	2,33
25,0	1,69	1,17	1,13	1,19	1,39	1,65	1,99	2,55
30,0	—	1,22	1,18	1,24	1,45	1,73	2,13	2,72

Примечание. Прочерк — нет данных; объем газа приведен в м^3 при давлении 0,1013 МПа и температуре 273,15 К.

Таблица 3

Растворимость пропана в воде ($\text{м}^3/\text{м}^3$) [10]

Давление, МПа	Температура, °С							
	20	40	60	80	100	120	140	160
2,5	0,29	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,28	0,30
5,0	0,31	0,26	0,27	0,30	0,35	0,42	0,49	0,56
10,0	0,31	0,27	0,28	0,31	0,38	0,48	0,62	0,75
15,0	0,31	0,28	0,29	0,32	0,39	0,51	0,68	0,85
20,0	0,32	0,28	0,29	0,33	0,41	0,53	0,72	0,92

Примечание. Объем газа приведен в м^3 при давлении 0,1013 МПа и температуре 273,15 К.

Растворимость пропана (4–6 % природного газа) в воде при различных давлениях и температурах отражена в табл. 3. При давлениях 20–30 МПа и температурах 120–140 °С в 1 м^3 воды может быть растворено $\approx 0,8 \text{ м}^3$ пропана. Экстраполируя данные табл. 3 на более высокие значения давления (прямые подтверждения не обнаружены), можно ожидать, что в 1 м^3 воды способно растворится до 1,5 м^3 пропана.

Обобщая данные этих таблиц, можно отметить следующую особенность растворимости газов в воде: при увеличении температуры растворимость газов в воде сначала уменьшается, затем, проходя через минимум, монотонно возрастает.

Гидрофизический механизм накопления газа в ловушке

Профессор А.Ю. Намиот подтвердил, что образование некоторых газовых залежей произошло в результате выделения из пластовой воды растворенного в ней газа [11]. Вода, насыщенная газом, поднимается в процессе гидротермальной циркуляции с больших глубин, постепенно перемещаясь из области высоких давлений в область более низких давлений. При снижении давления (возможно, и температуры, табл. 1) из воды выделяется растворенный в ней газ. Если в пласте имеются купольные ловушки, расположенные на разных глубинах, то выделяющийся газ, во-первых, скапливается в них, образуя газовые залежи. Во-вторых, состав газа в ловушках должен закономерно изменяться в соответствии с различной растворимостью газовых

компонентов в воде при различных давлениях. Газ, выделяющийся из воды при высоких давлениях (на больших глубинах), должен содержать больше плохо растворимых в воде гомологов метана, чем газ, выделяющийся из воды при более низких давлениях (на меньших глубинах).

Расчетами, выполненными для двух залежей Ставропольского газоносного района — Расшеватской (глубина 1000 м; давление 12 МПа) и Кугельтинской (глубина 600 м; давление 6,6 МПа), полностью подтверждено первоначальное предположение о происхождении одной залежи из другой. Особенно точным оказалось сопоставление содержаний бутана и пропана, рассчитанных на основании теоретических предпосылок, с экспериментальными данными, полученными при анализе составов газа в этих залежах [10].

Гидрофизический механизм миграции газа. Возникает, однако, вопрос, каковы же механизмы образования восходящих градиентов, под действием которых движутся воды, насыщенные газом, перенося компоненты газа от места их возникновения до газовой ловушки? Ответ на него может указать предположительные места локализации газовых залежей по отношению к материнским породам, в которых он созрел. По мнению авторов, одним из основных механизмов миграции газа является его перенос в водном растворе в процессе гидротермальной циркуляции [1, 4–7, 12].

Гидротермальная циркуляция — мощный гидрофизический процесс, хорошо известный геологам, но практически не изученный с позиций механики и математики. Общеизвестна его роль в образовании рудных тел месторождений полиметаллов, золота, серебра и др. Такая циркуляция особенно значительна в рифтовых зонах и зонах разлома [1].

Схема гидротермальной циркуляции водных растворов более или менее однообразна. Под действием источников тепла в земной коре возникает мощная термоконвекция, движение жидкости за счет разности плотностей горячих и холодных растворов. Горячие гидротермальные растворы поднимаются вверх, а холодные опускаются вниз. Состав фильтрующегося раствора изменяется в соответствии с локальным термодинамическим равновесием между насыщающим раствором и вмещающими породами. Но когда в последних возникает движение (фильтрация) флюида, частицы раствора перемещаются в поле температуры и давления и термодинамическое равновесие нарушается. Процессы, стремящиеся восстановить термодинамическое равновесие, приводят к тому, что отдельные компоненты вещества или мобилизуются из вмещающей породы в раствор, или просто переносятся им на значительные расстояния, или осаждаются из него в породу [4–7].

Можно предположить, что миграция газа также связана с гидротермальной циркуляцией воды [12]. Согласно гипотезе авторов, формирование газовых залежей происходит за счет выделения газа из водного раствора в процессе гидротермальной циркуляции. Расчеты показали, что вблизи мест резкого утончения земной коры в поровом пространстве

ное поле во вмещающих породах заранее не известно. Известны лишь источники, генерирующие его. Поэтому для определения температурного поля во вмещающих породах дополнительно привлекается к рассмотрению уравнение притока тепла (изменения энергии в горном массиве). В установившемся случае это уравнение имеет вид:

$$v_s \nabla_s T = \alpha \cdot \nabla^2 T(x, y, z), \quad (7)$$

где $\alpha = \lambda / (\rho \cdot C)$ — коэффициент температуропроводности флюидонасыщенных пород; C, ρ, λ — их теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности соответственно. Левая часть (7) представляет собой конвективный поток тепла (т. е. перенос тепла вместе с движущимся флюидом), а правая — кондуктивный поток тепла, обусловленный теплопроводностью вмещающих пород.

Уравнение (7) нельзя решить отдельно от других уравнений задачи, потому что в его левую часть входят неизвестные компоненты вектора скорости фильтрации v_s , генерируемые самим тепловым полем. В результате возникает некая «самосогласованная» задача о нахождении всех параметров процесса одновременно. Совместное решение системы дифференциальных уравнений (6) и (7), дополненной краевыми условиями (на поверхностях, ограничивающих рассматриваемый массив вмещающих пород), позволяет рассчитывать термобарические и фильтрационные поля в различных случаях.

Формулировка проблемы в терминах функции тока. Для визуализации линий тока флюида, содержащего компоненты природного газа, в ряде случаев можно использовать функцию тока ψ . Для плоского течения в вертикальном разрезе пород закон Дарси (1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \\ w = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \end{cases} \quad (8)$$

где $u(x, z)$, $w(x, z)$ — горизонтальная и вертикальная составляющие вектора скорости фильтрации; x, z — горизонтальная и вертикальная пространственные координаты (ось OZ направлена вертикально вверх); $p(x, z)$ — давление; $\psi(x, z)$ — функция тока.

Исключая давление p из системы уравнений (8), получаем уравнение для функции тока $\psi(x, z)$:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{p, c_s} g \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (9)$$

При этом зависимость плотности жидкости от давления и концентраций не учитывается, т. е. $\rho = \rho(T)$.

Поскольку уравнение (9) незамкнуто, так как не известна функция T , то к этому уравнению нужно добавить уравнение (7) конвективной теплопроводности, приобретающее в данном случае вид:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (10)$$

Таким образом, возникает система двух дифференциальных уравнений для определения двух неизвестных функций $\psi(x, z)$ и $T(x, z)$.

Кроме того, совместно с (9) и (10) рассматривается уравнение, определяющее интенсивность выделения газа в той или иной точке массива пород:

$$m \rho_0 \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c^0}{\partial x} + w \frac{\partial c^0}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

где ρ_0 — невозмущенное значение плотности пластовой воды; $c^0(p, T)$ равновесная концентрация газа в воде при локальных значениях p и T .

Алгоритм расчета фильтрационных потоков, переносящих газ

В качестве предварительных примеров, рассматривалась гидротермальная циркуляция флюида в бесконечном слое вмещающих пород, мощность которого скачкообразно изменялась. Считается, что такая ситуация моделирует поведение гидротерм вблизи перехода с суши на море (рис. 1).

Краевыми условиями для функции тока ψ принималось условие постоянства давления на поверхности моря и суши ($p = \text{const}$ или $\partial \psi / \partial z = 0$); условие $\psi(x, 0) = 0$ на подошве слоя пород, означающее, что она является линией тока, а также условие $w = 0$ или $\partial \psi / \partial x = 0$ на части берега ($x = 0$), контактирующего с морем. На верхней границе слоя (как на берегу, так и на дне моря) температура полагалась равной T_0 ; на нижней T_1 , $T_1 \gg T_0$. Рассчитывалась возникающая циркуляция флюида: линии тока $\psi(x, 0) = \text{const}$ и изотермы теплового поля $T(x, z) = \text{const}$.

Вычислительный алгоритм. В качестве вычислительного метода использовался модифицированный алгоритм Зейделя—Липмана, состоящий в последовательном применении рекуррентных соотношений, аппроксимирующих уравнения Пуассона (9) и (10) стационарной теплопроводности [2, 9].

На рис. 2 приведены результаты расчета полей температуры (рис. 2, а) и линий тока (рис. 2, б). Результаты расчета температурных полей показывают, что в более узкой части слоя (под дном моря) градиенты температуры выше, чем в его более широкой части. Кроме того, температурное поле имеет периодический характер, подтверждая явление, названное «ячейками Бенара». Картина фильтра-



Рис. 1. К постановке задачи о гидротермальной циркуляции в слое переменной мощности

ное поле во вмещающих породах заранее не известно. Известны лишь источники, генерирующие его. Поэтому для определения температурного поля во вмещающих породах дополнительно привлекается к рассмотрению уравнение притока тепла (изменения энергии в горном массиве). В установившемся случае это уравнение имеет вид:

$$v_s \nabla_s T = \alpha \cdot \nabla^2 T(x, y, z), \quad (7)$$

где $\alpha = \lambda / (\rho \cdot C)$ — коэффициент температуропроводности флюидонасыщенных пород; C, ρ, λ — их теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности соответственно. Левая часть (7) представляет собой конвективный поток тепла (т. е. перенос тепла вместе с движущимся флюидом), а правая — кондуктивный поток тепла, обусловленный теплопроводностью вмещающих пород.

Уравнение (7) нельзя решить отдельно от других уравнений задачи, потому что в его левую часть входят неизвестные компоненты вектора скорости фильтрации v_s , генерируемые самим тепловым полем. В результате возникает некая «самосогласованная» задача о нахождении всех параметров процесса одновременно. Совместное решение системы дифференциальных уравнений (6) и (7), дополненной краевыми условиями (на поверхностях, ограничивающих рассматриваемый массив вмещающих пород), позволяет рассчитывать термобарические и фильтрационные поля в различных случаях.

Формулировка проблемы в терминах функции тока. Для визуализации линий тока флюида, содержащего компоненты природного газа, в ряде случаев можно использовать функцию тока ψ . Для плоского течения в вертикальном разрезе пород закон Дарси (1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\partial \psi}{\partial z}, \\ w = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \end{cases} \quad (8)$$

где $u(x, z)$, $w(x, z)$ — горизонтальная и вертикальная составляющие вектора скорости фильтрации; x, z — горизонтальная и вертикальная пространственные координаты (ось OZ направлена вертикально вверх); $p(x, z)$ — давление; $\psi(x, z)$ — функция тока.

Исключая давление p из системы уравнений (8), получаем уравнение для функции тока $\psi(x, z)$:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{p,c} g \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (9)$$

При этом зависимость плотности жидкости от давления и концентраций не учитывается, т. е. $\rho = \rho(T)$.

Поскольку уравнение (9) незамкнуто, так как не известна функция T , то к этому уравнению нужно добавить уравнение (7) конвективной теплопроводности, приобретающее в данном случае вид:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (10)$$

Таким образом, возникает система двух дифференциальных уравнений для определения двух неизвестных функций $\psi(x, z)$ и $T(x, z)$.

Кроме того, совместно с (9) и (10) рассматривается уравнение, определяющее интенсивность выделения газа в той или иной точке массива пород:

$$m \rho_0 \cdot \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c^0}{\partial x} + w \frac{\partial c^0}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

где ρ_0 — невозмущенное значение плотности пластовой воды; $c^0(p, T)$ равновесная концентрация газа в воде при локальных значениях p и T .

Алгоритм расчета фильтрационных потоков, переносящих газ

В качестве предварительных примеров, рассматривалась гидротермальная циркуляция флюида в бесконечном слое вмещающих пород, мощность которого скачкообразно изменялась. Считается, что такая ситуация моделирует поведение гидротерм вблизи перехода с суши на море (рис. 1).

Краевыми условиями для функции тока ψ принималось условие постоянства давления на поверхности моря и суши ($p = \text{const}$ или $\partial \psi / \partial z = 0$); условие $\psi(x, 0) = 0$ на подошве слоя пород, означающее, что она является линией тока, а также условие $w = 0$ или $\partial \psi / \partial x = 0$ на части берега ($x = 0$), контактирующего с морем. На верхней границе слоя (как на берегу, так и на дне моря) температура полагалась равной T_0 ; на нижней T_1 , $T_1 \gg T_0$. Рассчитывалась возникающая циркуляция флюида: линии тока $\psi(x, 0) = \text{const}$ и изотермы теплового поля $T(x, z) = \text{const}$.

Вычислительный алгоритм. В качестве вычислительного метода использовался модифицированный алгоритм Зейделя—Липмана, состоящий в последовательном применении рекуррентных соотношений, аппроксимирующих уравнения Пуассона (9) и (10) стационарной теплопроводности [2, 9].

На рис. 2 приведены результаты расчета полей температуры (рис. 2, а) и линий тока (рис. 2, б). Результаты расчета температурных полей показывают, что в более узкой части слоя (под дном моря) градиенты температуры выше, чем в его более широкой части. Кроме того, температурное поле имеет периодический характер, подтверждая явление, названное «ячейками Бенара». Картина фильтра-



Рис. 1. К постановке задачи о гидротермальной циркуляции в слое переменной мощности

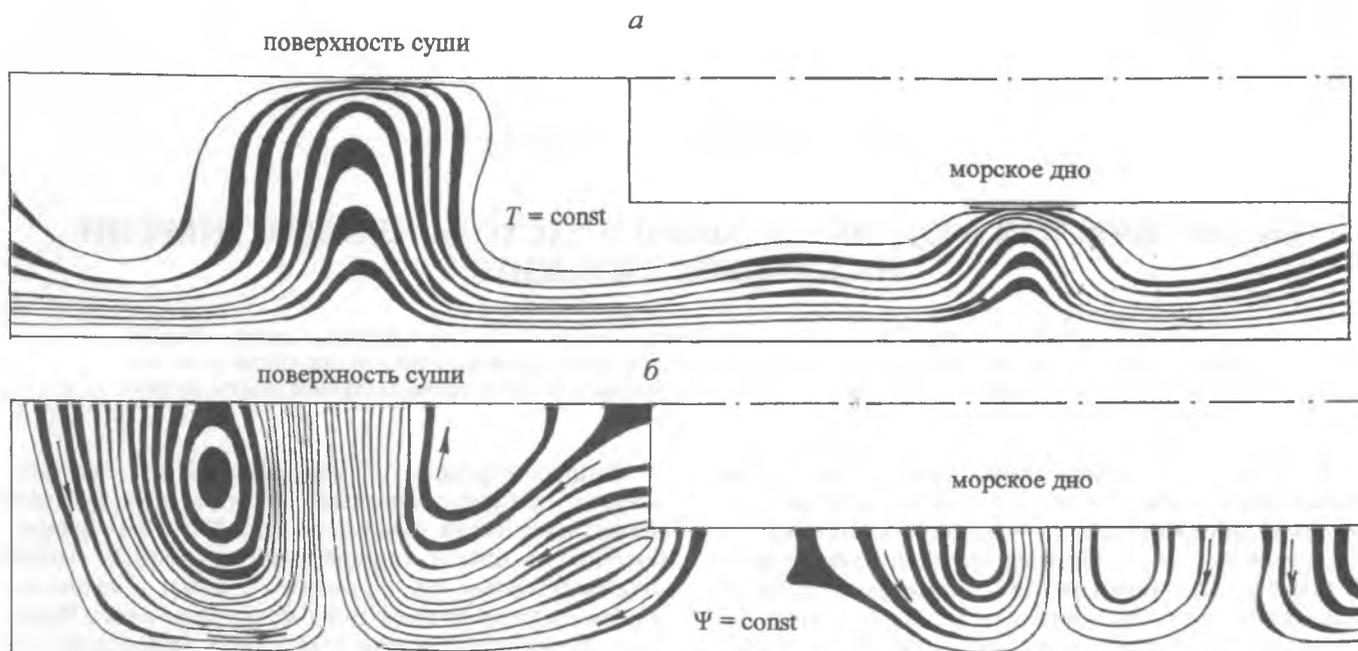


Рис. 2. Циркуляция флюида в области сочленения суши и моря: а — изотермы; б — линии тока

ционной циркуляции оказалась весьма примечательной. Линии тока начинаются на внешней поверхности более узкой части слоя (дне моря), и заканчиваются на ней, если циркуляционные ячейки находятся под морским дном. В этом случае тепловой поток подобно насосу прокачивает морскую воду через породы дна и выбрасывает ее обратно в море. Вблизи сечения, в котором мощность слоя резко изменяется, линии тока циркуляционного течения начинаются на поверхности узкой части слоя (дне моря), а заканчиваются на поверхности широкой части слоя (суше).

Полученное решение можно трактовать как объяснение физического механизма миграции газа. В восходящем движении флюида в процессе фильтрационной циркуляции давление в нем снижается, и растворенный газ выделяется из раствора, причем выделение происходит в широкой части слоя, моделирующей сушу, где естественней всего ожидать наличие ловушек.

Аналогичные расчеты были выполнены в случае анизотропных вмещающих пород, когда латераль-

ная проницаемость пород намного выше проницаемости пород в направлении, перпендикулярном горизонтальному напластованию. Расчеты показали, что вынос газа в приповерхностные слои земной коры в растворенном виде может происходить на расстоянии нескольких десятков километров от места созревания газа.

Заключение

Результаты завершеного этапа исследований вскрывают механизм гидротермального переноса компонент, составляющих природный газ, от места его созревания до ловушки. Этот механизм связан с возбуждением интенсивной циркуляции порового флюида в массиве вмещающих пород. В результате циркуляции углеводороды перераспределяются во вмещающих породах; ими обедняются одни участки толщ пород, а другие обогащаются. Математическое моделирование соответствующих процессов подтвердило возможность существования такого механизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа. 2-е изд. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 415 с.
2. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 1, М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1959. 464 с.
3. Брод И.О., Еременко Н.А. Основы геологии нефти и газа. М.: Недра, 1964. 57 с.
4. Брюховецкий О.С., Лурье М.В. Гидродинамические аспекты гидротермального происхождения рудных концентраций // Изв. вузов. Геология и разведка, 1992. № 3. С. 144–149.
5. Брюховецкий О.С., Лурье М.В. Циркуляция гидротермальных растворов в открытых и замкнутых ячейках вмещающих пород // Изв. вузов. Геология и разведка. 1994. № 2. С. 69–75.
6. Брюховецкий О.С., Лурье М.В. Газ на шельфах палеоморей // Нефтегазовая вертикаль. 2000. № 4. С. 150–151.
7. Брюховецкий О.С., Лурье М.В., Савилкин С.Б. Гидромеханический анализ процессов гидротермального оруденения в океане // Межвуз. сб. научных трудов «Геологические исследования океана». 1996. № 3. С. 79–95.
8. Губкин И.М. Учение о нефти. М.: Наука, 1975. 384 с.
9. Копченова Н.В., Марон И.А. Вычислительная математика в примерах и задачах. М.: Наука, 1972. 367 с.
10. Моделирование нефтеобразования / Под ред. С.Г. Неручева, О.К. Баженовой, Н.В. Марасановой. М.: Наука, 1992. 213 с.
11. Намиот А.Ю., Бондарева М.М. Растворимость газов в воде под давлением. М.: Гостехиздат, 1963. 246 с.
12. Перродон А. Формирование и размещение месторождений нефти и газа. (Пер. с франц., 2-е изд.). М.: Недра, 1991. 425 с.

Российский государственный геологоразведочный университет
Рецензент — В.П. Пименов