



УДК 553.981:551.762(763):551.24

## РОЛЬ ТЕКТОНО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ ЗАЛЕЖЕЙ ГАЗА НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

М. Ю. Зубков

Западно Сибирский геологический центр, Тюмень, Россия

Проведена оценка генерационных и емкостных свойств неокомских и юрских отложений северной части Западной Сибири. Рассмотрены варианты образования биогенного и абиогенного метана. Предложен тектоно-гидротермальный механизм формирования залежей газа в сеноманских отложениях. Прогнозируется распространение самых молодых сеноманских залежей газа в северном направлении под ложем Северного Ледовитого океана. С целью поисков углеводородных залежей предложен способ комплексирования данных сейсморазведки и выполненного на их основе тектонофизического моделирования.

**Ключевые слова:** неокомские отложения северной части Западной Сибири, биогенное и абиогенное происхождение метана, метоксильная группа, тектоно-гидротермальные процессы.

## ROLE OF TECTONIC AND HYDROTHERMAL PROCESSES IN THE FORMATION OF GAS POOLS IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA

M. Yu. Zubkov

West Siberian Geological Center, Tyumen, Russia

The generation and storage capacities of Neocomian and Jurassic sediments of the northern part of Western Siberia are evaluated. Variants of biogenic and abiogenic methanogenesis are considered. Tectonic and hydrothermal mechanism of the formation of gas pools in Cenomanian sediments is proposed. The youngest Cenomanian gas pools are predicted to be widespread northward under the Arctic Ocean bed. The method of seismic data integration and tectonophysical modelling based on it is proposed in order to search for hydrocarbon accumulations.

**Keywords:** Neocomian deposits of the northern Western Siberia, biogenic and abiogenic origin of methane, methoxy group, tectonic and hydrothermal processes.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-4-28-45

Механизм формирования залежей газа на севере Западной Сибири, несмотря на полувековой срок их изучения, до сих пор не имеет общепринятого объяснения. Исследователи обсуждают главным образом только происхождение (биогенное или абиогенное) метана, заполнившего ловушки в верхнемеловых (сеноман) отложениях, а способ образования самих залежей обычно не рассматривают или сводят к миграции газа по тектоническим нарушениям [5, 11–13, 22]. Несомненно, что определение генезиса метана представляет собой очень важную задачу, однако и собственно сам механизм заполнения метаном сеноманских песчано-алевритовых осадков также требует достоверного объяснения. Поэтому цель настоящей статьи – постараться разобраться в происхождении газа (биогенное и/или абиогенное) и предложить наиболее вероятный механизм его миграции и формирования залежей в сеноманских отложениях.

### Аппаратура и методики

Изучение вещественного состава отобранных образцов осуществлялось с помощью оптической микроскопии (поляризационный микроскоп Nikon Eclipse LV 100 Pol). Исследование нефтегазогенерационных свойств образцов, отобранных из разновозрастных отложений Медвежьего и Уренгойского месторождений, осуществлялось пиролитическим

методом на модифицированном программно-аппаратурном комплексе «Хроматэк-Кристалл 5000.2».

После удаления карбонатов из анализируемых образцов определялось содержание в них органического углерода ( $C_{орг}$ ) на анализаторе АН 7529-М,

Для проведения геохимических расчетов на основе полученных пиролитических данных применялась оригинальная диаграмма  $HI-T_{max}$ , которая построена с использованием результатов анализов элементного состава различных типов пород, характеризующихся повышенным содержанием  $OB$ .

От обычно используемых предлагаемая диаграмма отличается равномерным распределением изолиний катагенетического созревания  $OB$  того или иного типа от исходного («незрелого») его состояния до завершения процесса нефтегазогенерации (рис. 1, а) [6, 10].

Кроме значений  $HI$ , расположенных на правой оси ординат, для удобства ведения расчетов на левой оси нанесена равномерная шкала со значениями исходного нефтегазогенерационного потенциала всевозможных типов  $OB$ , которые изменяются от 0 до 100 %. С этой шкалы спускаются упомянутые гипотетические «нефтегазогенерационные» (сокращенно – генерационные) кривые, расположенные через 5 % друг от друга (см. рис. 1, б) [6]. В дальнейшем рассматриваемый параметр будем называть

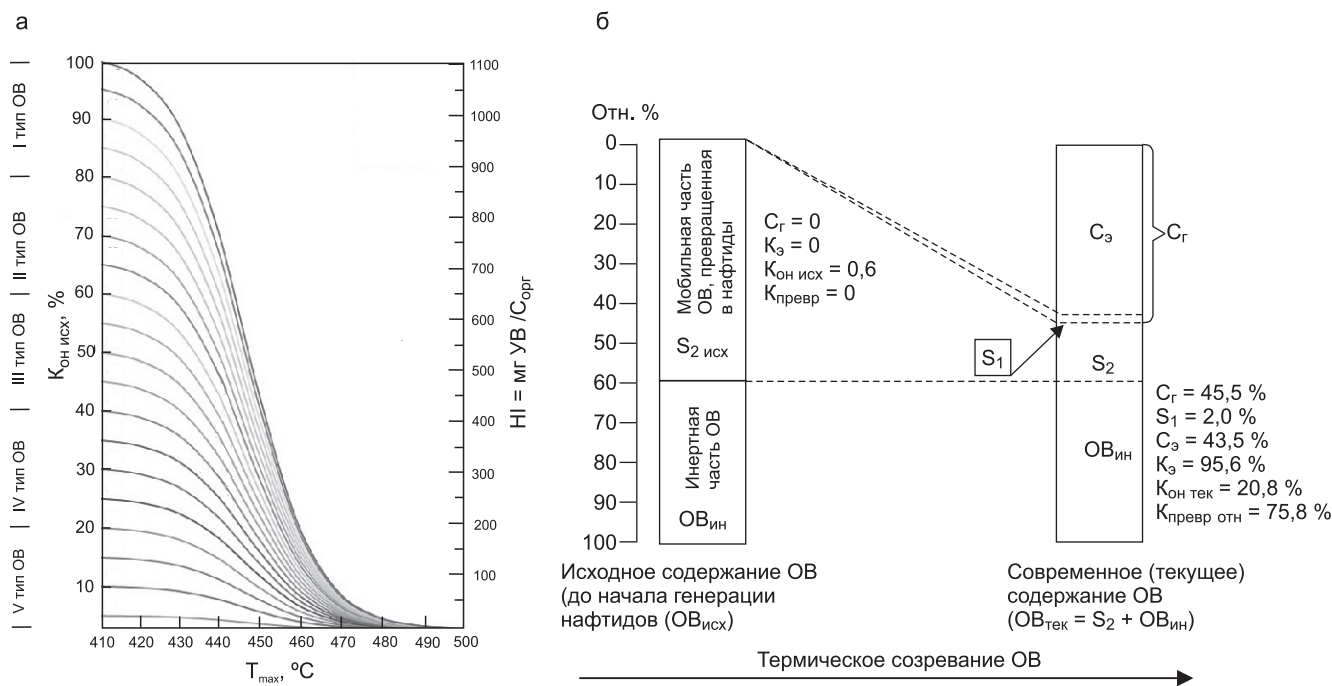


Рис. 1. Модифицированная диаграмма  $T_{max}-NI(K_{ON\text{ исх}})$  (а) и схема термического созревания органического вещества II типа (б) (по [6])

коэффициентом остаточной нефтегазогенерации ( $K_{ON}$ ), а его первоначальное (исходное) значение (до начала процесса нефтегазогенерации) обозначим как  $K_{ON\text{ исх}}$ . Именно эти значения  $K_{ON\text{ исх}}$ , как и  $NI$ , расположены на осях ординат напротив друг друга (см. рис. 1, а) [10].

Прежде чем приступить к расчетам нефтегазогенерационных свойств  $OB$ , входящего в состав образцов керна, отобранных на геохимические анализы с помощью идеализированной номограммы катагенетического созревания  $OB$ , сделаем некоторые пояснения и введем ряд обозначений.

Для облегчения понимания следующих экспериментальных и расчетных данных приведена упрощенная схема термического созревания  $OB$  II типа, в процессе которого происходит генерация им нафтидов (см. рис. 1, б) [6, 10].

Все расчетные генерационные параметры приводятся в весовых процентах, рассчитанных на породу.

В предыдущих публикациях [6, 10] подробно охарактеризованы методики определения: исходного содержания  $OB$  ( $OB_{исх}$ ); первоначального значения  $S_2$  ( $S_{2\text{ исх}}$ ), соответствующего мобильной (превращаемой в нафтиды) части  $OB$ ; значения  $K_{ON\text{ исх}}$  дающие представление об исходном значении остаточного нефтегазогенерационного потенциала (%); текущего значения остаточного нефтегазогенерационного потенциала ( $K_{ON\text{ тек}}$ ); абсолютного значения коэффициента превращения  $OB_{исх}$  в нафтиды ( $K_{превр\text{ абс}}$ ); относительного значения  $K_{превр\text{ отн}}$ ; количества образовавшихся ( $C_1$ ) и эмигрировавших ( $C_3$ ) нафтидов; коэффициента эмиграции ( $K_3$ ). Поэтому мы не будем останавливаться на описании методики и способах расчета перечисленных параметров.

При характеристике нефтегенерационных свойств анализируемых образцов пород использованы не все перечисленные параметры, а только наиболее информативные из них –  $K_{превр\text{ отн}}$ ,  $C_r$  и  $K_3$ .

Для реконструкции механизма формирования залежей газа в сеноманских отложениях применялись два метода тектонофизического моделирования (оптико-поляризационный и тектоно-седиментационный, которые далее для краткости обозначим как просто оптический и седиментационный). Основой для тектонофизического моделирования служили сейсмические разрезы [7].

Оптический метод исследования напряжений основан на явлении двулучепреломления в прозрачных аморфных оптически активных материалах (использовался желатин), подвергнутых деформации. При этом изменение двойного лучепреломления в таких телах находится в прямой зависимости от величины напряжений, возникающих в деформируемом теле [7].

Построение траекторий нормальных и касательных напряжений производилось на основе съемки изохром и изоклин, возникающих в напряженной модели в результате двулучепреломления [7, 8]. Преимущества метода используются для выявления участков повышенных значений касательных напряжений  $\tau_{max}$  и прогноза в их пределах разрывных дислокаций в направлении траекторий нормальных и касательных напряжений, построенных по карте изоклин оптического поля [7, 8].

Седиментационный метод представлен двумерным седиментационным моделированием. Седиментационные модели изготавливались из двух основных типов осадков – компетентных и некомпетентных; первые – из цемента и/или алебаstra,



Таблица 1

Усредненные результаты пиролитических исследований и рассчитанные на их основе нефтегенерационные свойства образцов пород юрского и мелового возраста, отобранных из скв. 50 Медвежьего, скв. 292 и 739 Уренгойского месторождений

Интервал, м (объект)	C <sub>орг</sub> % на исходную породу	УВ, мг/г породы		Нl, мг УВ/С <sub>орг</sub>	T <sub>max</sub> , °C	K <sub>превр.отн.</sub>	C <sub>г</sub> %	K <sub>з</sub>
		S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>					
<i>Медвежье месторождение, скв. 50</i>								
Пласт БН <sub>5</sub>	<u>0,46–1,86</u> 1,05 (9)	<u>0,09–0,03</u> 0,20	<u>0,18–4,74</u> 1,23	<u>29,6–396,5</u> 105,5	<u>425–438</u> 432	<u>19,25–48,7</u> 31,63	<u>0,01–0,12</u> 0,04	<u>8–62</u> 36
Пласт БН <sub>7</sub>	<u>0,37–0,65</u> 0,46 (5)	<u>0,10–0,17</u> 0,13	<u>0,12–0,31</u> 0,19	<u>31,0–49,0</u> 42,0	<u>425–431</u> 429	<u>31,14–49,18</u> 43,40	<u>0,01–0,02</u> 0,016	<u>15–27</u> 19
Пласт БН <sub>10</sub>	<u>0,48–1,03</u> 0,67 (8)	<u>0,16–0,40</u> 0,23	<u>0,18–0,98</u> 0,41	<u>31,0–49,0</u> 58,0	<u>430–439</u> 434	<u>31,28–52,65</u> 40,35	<u>0,02–0,05</u> 0,03	<u>0–39</u> 19
Пласт БН <sub>11</sub>	<u>0,53–0,69</u> 0,62 (5)	<u>0,14–0,19</u> 0,17	<u>0,16–0,43</u> 0,26	<u>23,0–68,0</u> 42,0	<u>429–442</u> 437	<u>28,09–48,00</u> 40,45	<u>0,02–0,03</u> 0,023	<u>14–36</u> 22
<i>Уренгойское месторождение, скв. 739</i>								
Надачимовская толща	<u>0,34–0,81</u> 0,63 (13)	<u>0,01–0,04</u> 0,03	<u>0,06–0,70</u> 0,31	<u>14,6–94,6</u> 45,2	<u>445–450</u> 448	<u>42,16–60,62</u> 48,10	<u>0,03–0,26</u> 0,13	<u>59–99</u> 82
Ачимовская и подачимовская толщи	<u>0,74–1,80</u> 1,33 (7)	<u>0,02–0,70</u> 0,29	<u>0,70–3,43</u> 2,08	<u>82,9–214,4</u> 150,3	<u>446–451</u> 449	<u>36,0–47,51</u> 43,0	<u>0,05–0,29</u> 0,16	<u>15–27</u> 19
Баженовская свита и верхняя часть георгиевской	<u>5,50–6,60</u> 6,10 (6)	<u>0,90–7,00</u> 4,45	<u>7,81–38,09</u> 24,66	<u>134,7–692,5</u> 409,4	<u>446–449</u> 447	<u>36,71–72,86</u> 47,03	<u>0,61–10,3</u> 3,13	<u>70–93</u> 81
<i>Уренгойское месторождение, скв. 292</i>								
Надачимовская толща	<u>0,47–0,96</u> 0,65 (7)	<u>0,07–0,36</u> 0,14	<u>0,32–1,55</u> 0,70	<u>60,0–174,0</u> 101,0	<u>429–440</u> 435	<u>18,72–36,06</u> 27,04	<u>0,01–0,04</u> 0,02	<u>5–58</u> 42
Ачимовская и подачимовская толщи	<u>0,51–5,56</u> 1,91 (7)	<u>0,08–1,79</u> 0,64	<u>0,38–11,10</u> 3,04	<u>75,0–216,0</u> 132,0	<u>433–452</u> 442	<u>20,08–52,47</u> 33,75	<u>0,02–1,30</u> 0,25	<u>9–86</u> 47
Нижневасюганская подсвита	0,99 (1)	0,13	0,45	46,0	445	47,38	0,05	72
Верхняя часть большехетской серии	<u>1,72–22,47</u> 8,91 (24)	<u>0,41–10,10</u> 3,19	<u>1,55–63,82</u> 19,50	<u>77,0–351,0</u> 180,0	<u>449–467</u> 460	<u>42,75–89,52</u> 74,10	<u>0,13–22,7</u> 7,14	<u>53,98</u> 92
Средняя часть большехетской серии	<u>4,03–39,30</u> 18,27 (5)	<u>1,40–12,68</u> 6,11	<u>3,13–93,37</u> 40,52	<u>78,0–239,0</u> 191,0	<u>456–465</u> 461	<u>61,45–93,19</u> 78,64	<u>0,54–81,7</u> 30,24	<u>74–99</u> 91

Примечание. В числителе – интервал значений, в знаменателе – среднее (в скобках – кол-во образцов).

вторые – из природных песчано-алевритовых и глинистых осадков [7].

### Результаты исследований

Сначала постараемся оценить генерационные свойства нижнемеловых (неоком) и юрских (баженовская свита, большехетская серия) отложений, чтобы понять, хватит ли генерируемых этими отложениями нафтидов для заполнения пород-коллекторов, входящих в состав меловых отложений, и, конечно, в первую очередь сеноманских песчаников. С этой целью сначала были исследованы генерационные способности образцов, отобранных из неокомских и юрских отложений Медвежьего и Уренгойского месторождений (рис. 2–4; табл. 1).

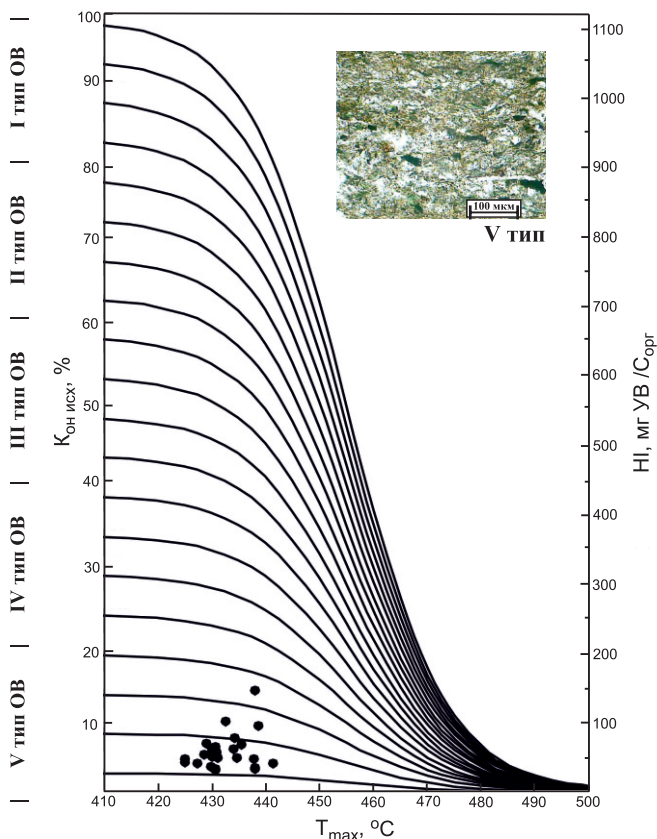
Анализ полученных результатов показал, что степень катагенетического или термического пре-

ращения исходного ОВ в нафтиды закономерно увеличивается с ростом глубины и возраста отложений от 31,6 % (пласт БН<sub>5</sub>) до 78,6 % (средняя часть большехетской серии). В этом же направлении отмечается рост коэффициента эмиграции образовавшихся нафтидов (от 36 до 91 %).

Крайне низкими генерационными свойствами (0,016–0,13 %) отличаются глинистые осадки тангаловской свиты (пласты БН<sub>5</sub>–БН<sub>11</sub>) и надачимовские отложения (см. табл. 1), что объясняется очень низким содержанием в них ОВ и преимущественно гумусовым его составом (см. рис. 2–4).

Ачимовские и подачимовские отложения генерировали почти на порядок больше нафтидов, чем рассмотренные ранее осадки, но их абсолютные значения также невелики и в среднем изменяются от 0,13 до 0,25 % (см. рис. 3, 4, табл. 1).





**Рис. 2.** Модифицированная диаграмма  $T_{max} - HI(K_{он\ иск})$  и фотография петрографического шлифа образца, содержащего V тип ОВ, Медвежье месторождение, скв. 50 (по [10])

Самыми высокими генерационными свойствами характеризуются осадки баженовской свиты (до 10,3 %) и углистые отложения большехетской серии

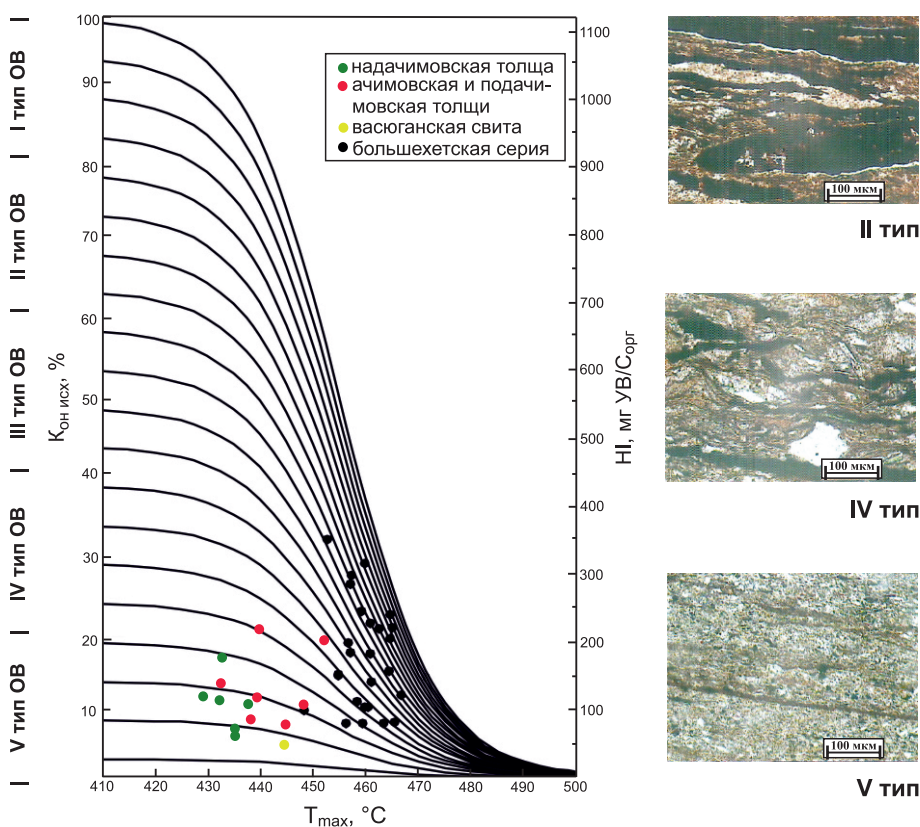
(в среднем 7,14–30,24 %). Такие высокие значения объясняются высокой степенью термического (катагенетического) преобразования этих отложений и преимущественно сапропелевым составом исходного ОВ (см. рис. 3, табл. 1). Иными словами, углистые глины и глинистые угли, входящие в состав большехетской серии, сложены остатками не высшей, а низшей (преимущественно водорослевой) растительности [10].

Используя данные о мощности пород-генераторов и коллекторов в составе рассматриваемых отложений, вскрытых тремя рассматриваемыми скважинами, несложно определить их удельные (в расчете на 1 м<sup>2</sup>) генерационные и емкостные свойства (табл. 2).

Из выполненных расчетов следует, что объем порового пространства в неокомских отложениях (сортымская и тангаловская свиты) в десятки и даже сотни раз превышает объем нафтидов, образовавшихся в этих же отложениях. Даже с учетом нафтидов, генерированных баженовской свитой, поровое пространство пород-коллекторов сортымской свиты превышает их объем в 3 раза (см. табл. 2).

Лишь углисто-глинистыми отложениями большехетской серии генерировано почти в 2 раза больше нафтидов, чем способны вместить одновозрастные породы-коллекторы и ачимовские осадки. Следовательно, «избыточные» их объемы могли попасть выше, например, в песчано-алевритовые отложения тангаловской или даже покурской свит (см. табл. 2).

Из полученных результатов следует однозначный вывод: генераторами нафтидов являются юр-



**Рис. 3.** Модифицированная диаграмма  $T_{max} - HI(K_{он\ иск})$  и фотографии петрографических шлифов образцов, содержащих различные типы ОВ, Уренгойское месторождение, скв. 292 (по [10])





Таблица 2

Результаты удельных (на 1 м<sup>2</sup>) нефтегенерационных и емкостных свойств юрских и неокомских отложений Медвежьего (скв. 50) и Уренгойского (скв. 739 и 292) месторождений

Объект	Объем образовавшихся УВ ( $V_{ув}$ )·10 <sup>-2</sup> , м <sup>3</sup>	Суммарная эффективная емкость песчаников ( $V_{пор}$ ), м <sup>3</sup>	Соотношение генерационных и емкостных свойств пород	
			$V_{ув}/V_{пор}$	$V_{пор}/V_{ув}$
<i>Медвежье месторождение, скв. 50</i>				
Пласт БН <sub>5</sub>	0,90	0,75	–	83,3
Пласт БН <sub>7</sub>	0,45	1,41	–	313,3
Пласт БН <sub>10</sub>	0,77	0,36	–	46,8
Пласт БН <sub>11</sub>	0,30	0,23	–	46,7
В целом по скважине	2,42	2,75	–	113,6
<i>Уренгойское месторождение, скв. 739</i>				
Надачимовская толща	12,0	2,14	–	17,8
Ачимовская и подачимовская толщи	4,0	2,52	–	63,0
Баженовская свита и верхняя часть георгиевской	128	0,005*	256	–
В целом по скважине	144,0	4,67	–	3,2
<i>Уренгойское месторождение, скв. 292</i>				
Надачимовская толща	0,50	1,82	–	364,0
Ачимовская и подачимовская толщи	4,90	1,90	–	34,8
Нижневасюганская подсвита	–	–	–	–
Верхняя часть большехетской серии	872,20	1,26*	6,9	–
Средняя часть большехетской серии	–	–	–	–
В целом по скважине:	882,58	4,98	1,8	–

\*Значения относятся к битуминозным аргиллитам и углистым глинам.

ские осадки, а коллекторами – преимущественно нижнемеловые отложения [10]. Причем генерированных юрскими осадками УВ явно недостаточно, чтобы насытить породы-коллекторы сортымской и тангаловской свит, не говоря уже о покурской, в кровельной части (сеноман) которой присутствуют огромные запасы газа.

Следует также помнить, что между продуктивными пластами тангаловской свиты и газоносными сеноманскими горизонтами находится мощная пачка глинистых флюидоупоров, в которой толщина отдельных прослоев глин достигает 20–30 м. Поэтому УВ, генерированным юрскими битуминозными отложениями баженовской свиты и углистыми осадками большехетской серии, очень сложно попасть в сеноманские песчаники через этот многометровый экран.

Таким образом, исходя из органогенной (осадочно-миграционной) концепции образования газовых залежей в сеноманских песчаниках, можно предположить, что источник газа присутствует именно в осадках покурской свиты.

Нижняя часть покурской свиты, по мнению большинства исследователей, накапливалась в континентальных условиях и в ее составе присутствуют

маломощные (0,2–0,4 м) углистые отложения, содержащие преимущественно гумусовое ОВ. В настоящее время это ОВ находится на бурогольной стадии катагенеза, и, следовательно, угли относятся к категории бурых, т. е. пока еще не вступивших в нефтяное «окно». На основе данных изотопных исследований углерода, метан, являющийся главным компонентом сеноманских газовых залежей, вероятно, имеет преимущественно биогенный генезис [1, 5, 20, 21]. Тем не менее очевидно, что раннедиагенетический биогенный метан, образовавшийся на начальной стадии анаэробного преобразования осадка автотрофными микроорганизмами (метаногенами), был утерян из-за отсутствия надежного флюидоупора. Поэтому остается предположить, что залежи газа образовались термофильными метаногенами гораздо позднее.

О такой возможности свидетельствует недавнее открытие западных ученых, установивших, что бурый уголь (лигнит) превращается в каменный (они называют его битуминозным) в результате воздействия на него термофильных метаногенов (*Methermicoccus shengliensis*) [25].

Чтобы разобраться с механизмом образования метана из лигнита, рассмотрим состав и стро-

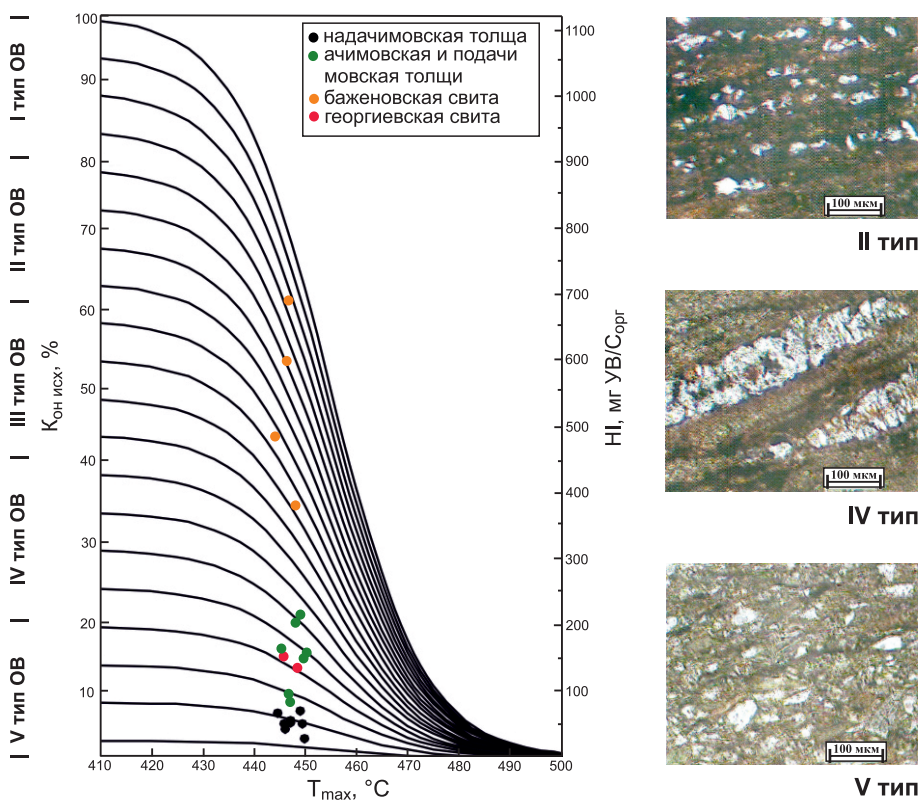


Рис. 4. Модифицированная диаграмма  $T_{max} - HI(K_{он\text{ исх}})$  и фотографии петрографических шлифов образцов, содержащих различные типы ОВ, Уренгойское месторождение, скв. 739 (по [10])

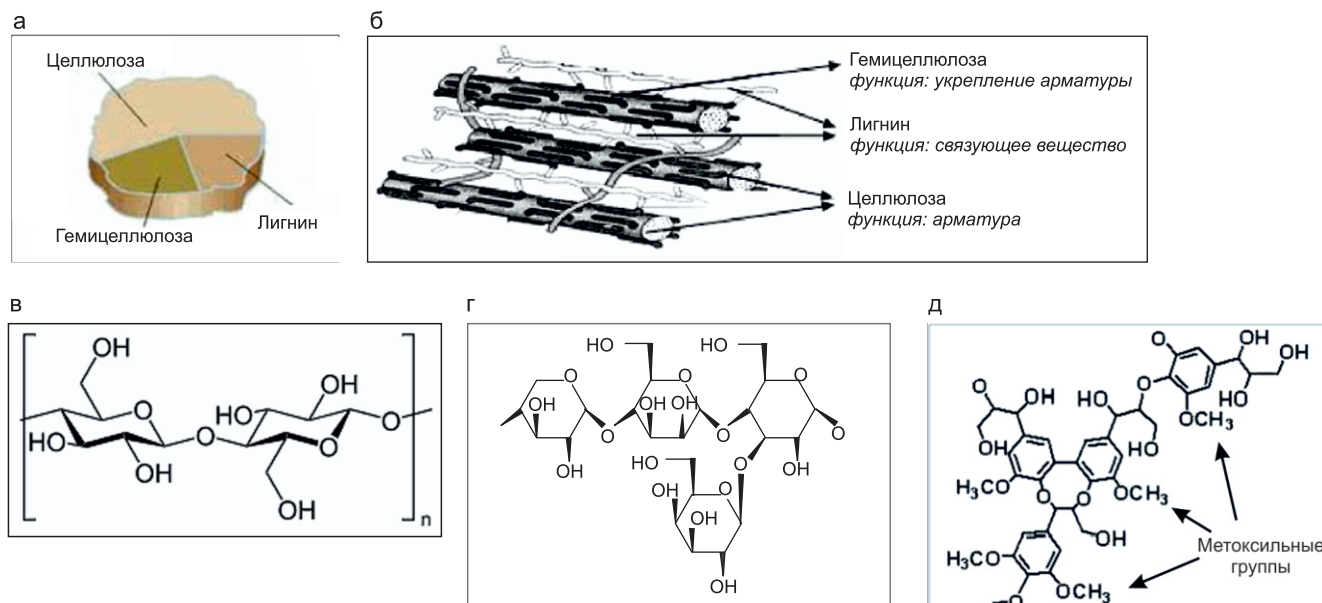


Рис. 5. Состав (а) и строение (б) древесины, а также фрагменты молекулярного строения главных компонентов древесины: целлюлозы (в), гемцеллюлозы (г) и лигнина (д)

ение древесины. Основные компоненты древесины – первые два являются полисахаридами (см. рис. 5, в, г), поэтому они еще в диагенезе активно разлагаются микроорганизмами, а в анаэробных условиях – в том числе и метаногенами, которые на этом этапе генерируют метан с самым изотопно легким углеродом ( $\delta^{13}C$  до  $-80\text{‰}$ ). Поэтому к бурой угольной стадии преимущественно сохраняется лишь лигнин, который и является главным компонентом бурого угля, или лигнита (см. рис. 5, д).

По данным [25], основной компонент при выработке микроорганизмами метана – метоксильные

группы ( $O-CH_3$ ), которые микроорганизмы отделяют от молекул лигнина, входящих в состав лигнита (см. рис. 5, д).

В настоящее время пластовые температуры в рассматриваемых отложениях составляют  $75-90^\circ C$ . Эти значения критические для выживания даже термофильных микроорганизмов, поэтому можно предположить, что сейчас процесс генерации метана этой группой микроорганизмов преимущественно закончился.

К сожалению, оценка удельного содержания ОВ в составе покурской свиты, и в частности в ее



нижней («континентальной») части, не проводилась. Поэтому для оценочных расчетов примем в ней суммарную мощность рассеянного и концентрированного ОВ гумусового типа равной 20 м, а содержание метоксильных групп в этом ОВ, из которого путем деметилирования микроорганизмами выработывался метан, равным 10 % [25]. Вычисления проведем в расчете на площадь 1 м<sup>2</sup>. Примем мощность газонасыщенного песчаника равной 100 м, а его эффективную пористость – 30 %. Тогда объем порового пространства в столбе песчаника, имеющего объем 100 м<sup>3</sup> составит 30 м<sup>3</sup>. Будем считать плотность газа в пластовых условиях равной 70 кг/м<sup>3</sup>. Тогда его вес в этом столбе песчаника с основанием 1 м<sup>2</sup> составит 2100 кг.

Будем считать плотность лигнита равной 1300 кг/м<sup>3</sup>. Тогда, исходя из его суммарной мощности (20 м) и содержания метоксильных групп (10 %), их вес на той же площади (1 м<sup>2</sup>) составит 2600 кг. Если предположить, что коэффициент эмиграции образовавшегося биогенного метана близок к 100 % и метан практически полностью собрался в сеноманском песчанике, то количество генерированного за счет метоксильных групп лигнита метана и его содержание в столбе песчаника с таким же основанием имеют близкие значения.

Рассмотрим теперь альтернативную (абиогенную) точку зрения на образование сеноманских залежей газа, для чего используем данные ученых-вулканологов. Трудность оценки содержания абиогенного метана в составе вулканических газов заключается в том, что его концентрация варьирует в значительных пределах (от 0,005 до 20,1 %) [4, 14, 17, 26], причем зависит от типа магматического расплава, из которого он выделяется, его температуры, и, кроме того, изменяется во времени. Даже в пределах одного и того же вулканического аппарата в составе газов, выделяющихся из разных полостей и трещин, содержание метана также варьирует в значительных пределах [4, 14, 17]. Поэтому проводимые расчеты имеют лишь очень приблизительный оценочный характер.

В работах [4, 14] приводятся данные о количестве метана, выделяющегося в пределах трех термальных полей знаменитой кальдеры Узон (Камчатка), – около 560 тыс. м<sup>3</sup>/год. По самым скромным оценкам, запасы метана в ЯНАО составляют 93 трлн м<sup>3</sup>. Исходя из приведенных данных, для создания обсуждаемых залежей газа термальным площадкам кальдеры Узон потребовалось бы 166 млн лет!

Однако эти расчеты сделаны лишь для единичной вулканической кальдеры, имеющей сравнительно небольшую площадь (около 100 км<sup>2</sup>), ограниченную размером расположенного под ней магматического тела. Поэтому известный интерес представляет оценка площади магматических тел, из которых могли бы выделиться объемы метана, необходимые для создания се-

номанских залежей газа за определенный период времени.

Время образования залежей газа точно не установлено, однако можно предположить, что они имеют сравнительно молодой (кайнозойский) возраст. Такой же точки зрения придерживался и Э. М. Галимов [2]. Чтобы приблизительно определить период, в течение которого могли образоваться газовые залежи, исходя из предположения об их абиогенном образовании, пересчитаем полученные ранее результаты на определенную площадь. Эти расчеты показывают, что со всех трех площадок кальдеры Узон в год выделяется около 8,9 тыс. м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup> метана.

Тогда, если предположить, что суммарная площадь генерирующих площадок, расположенных в фундаменте северной части Западной Сибири, составляет, например, 1000 км<sup>2</sup>, то с их площади выделится в год примерно 9 млн м<sup>3</sup> метана. Исходя из минимальных оценок запасов метана в ЯНАО (93 трлн м<sup>3</sup>) потребуется около 10,5 млн лет для того, чтобы накопить такие запасы с выбранной для расчетов площадки (без учета рассеявшейся и растворившейся в пластовых водах его части).

Рассмотрим факты, свидетельствующие о присутствии эндогенных (ювенильных) флюидов в осадочном чехле рассматриваемого района Западной Сибири.

В самых первых публикациях, в которых рассматривалась возможность проникновения ювенильных флюидов в юрские и меловые отложения, в качестве доказательств использовались следующие критерии: высокие геотермические градиенты и, соответственно, повышенные пластовые температуры, развитие вертикальной миграции СО<sub>2</sub> и слабоминерализованных щелочных вод [12, 18, 19]. По мнению исследователей, проникновение таких глубинных растворов из фундамента приводит к формированию в юрских и/или меловых отложениях гидрохимической инверсии с превращением минерализованных (жестких) пластовых вод хлоркальциевого типа в слабо минерализованные гидрокарбонатно-натриевые щелочные воды. Решающее влияние на состав и минерализацию пластовых вод в местах проникновения в них эндогенных гидротермальных растворов А. А. Розин и З. Я. Сердюк связывают с присутствием в них большого количества СО<sub>2</sub> [18, 19].

В недавней публикации Т. А. Киреевой и Д. И. Будановой [11] приводятся следующие доказательства присутствия в меловых отложениях северной части Западной Сибири гидротермальных растворов:

– отмечается нарушение нормальной вертикальной гидрохимической зональности и формирование инверсионного гидрохимического разреза, характеризующегося снижением с глубиной общей минерализации пластовых вод, обнаружение в нижнеэокомских отложениях вод с минерализа-



цией 1–7 г/л, а также одновременное изменение химического состава пластовых вод с Cl-Na-Ca на  $\text{HCO}_3^-$ -Cl-Na;

– отношения В/Вг, а также Na-K геотермометр свидетельствуют о том, что формирование мало-минерализованных гидрокарбонатно-натриевых вод произошло в результате поступления в водоносные породы значительного количества гидротермальных (температура 150–279 °С) ювенильных флюидов, насыщенных  $\text{CO}_2$ ;

– установленному увеличению температуры растворов соответствует четко выраженное снижение их минерализации (<5 г/л), которое коррелирует с температурой формирования раствора (>100 °С), а уменьшению минерализации до значений <1 г/л – температура до 279 °С;

– полученным значениям отношения В/Вг > 2 соответствует температура не менее 200 °С;

– установленное отношение В/Вг в нижнемеловых отложениях значительно (на порядок) превышает таковые, характерные для седиментогенных пластовых вод, и приближается к значениям, типичным для современных гидротерм.

В работе, посвященной гидрохимической зональности и типизации подземных вод Западно-Сибирского бассейна [3] действительно отмечается заметный рост концентрации в северном направлении иона  $\text{HCO}_3^-$  в составе пластовых вод ниже-

меловых отложений и смена типа вод с Cl-Na-Ca на  $\text{HCO}_3^-$ -Cl-Na (рис. 6).

В этом же направлении установлено значительное увеличение геотермического градиента с обычного 3,3°/100 м на юге бассейна до 5,5°/100 м и даже выше на севере. Кроме того, в северном направлении отмечается снижение напоров (пластовых давлений) с юга на север, что вызывает движение пластовых вод и наклон газо-водяных контактов ряда залежей на северо-северо-восток [13, 15, 18, 22].

При этом в верхней части осадочной толщи пластовые давления аномально низкие (АНПД), особенно в верхнемеловых отложениях (здесь сформировалась зона разрежения (разуплотнения), механизм формирования которой будет рассмотрен далее). В нижней (юрской) части осадочного разреза пластовые давления часто проявляются в виде АВПД [22] Иными словами, в юрских осадках наблюдается область сжатия.

Установлено гидротермальное или, вернее, тектоно-гидротермальное воздействие на неокотские отложения северной части Западной Сибири [8]. Оно проявилось в активном выщелачивании кислыми с низкой минерализацией гидротермальными флюидами неустойчивых в этих условиях минералов (прежде всего плагиоклазов и мафических минералов) и, напротив, в кристаллизации эпигенетических гидротермальных минералов, представленных кварцем, каолинитом (диккитом), сидеритом, рутилом, баритом, разнообразными сульфидами (рис. 7), редкоземельными карбонатами, фосфатами и силикатами, которые часто ассоциируют с битумом (рис. 8).

В 1988 г. Н. А. Озерова (Петропавловск-Камчатский) при личной встрече сообщила, что в газопроводных трубах жилых домов тогдашней ГДР была обнаружена капельножидкая ртуть! Экологи, исследовавшие почву вблизи газовых фонтанов, расположенных на территории ЯНАО, также отметили повышенные концентрации ртути. Выделения ртути вместе с газовыми эманациями и гидротермальными растворами хорошо известны [16, 17, 23]. Поэтому присутствие ртути в составе газа может свидетельствовать о его если не полной, то хотя бы частичной связи с эндогенными процессами, так как растительные и животные организмы не содержат в себе ртуть в силу ее крайней токсичности, а потому и биогенный газ не может ее содержать.

При определении генезиса метана чаще всего используется изотопный состав углерода в его составе [1, 2, 5, 21, 25]. По этому признаку обычно выделяют две главные генетические разновидности метана:

– биогенный ( $\delta\text{C}^{13}$  от –80 до –50 ‰) [1, 2, 5, 21, 25];

– эндогенный в изверженных породах, прошедший этап изотопного обмена с  $\text{CO}_2$  ( $\delta\text{C}^{13}$  от –27 до –22 ‰) [2, 5, 21, 25].

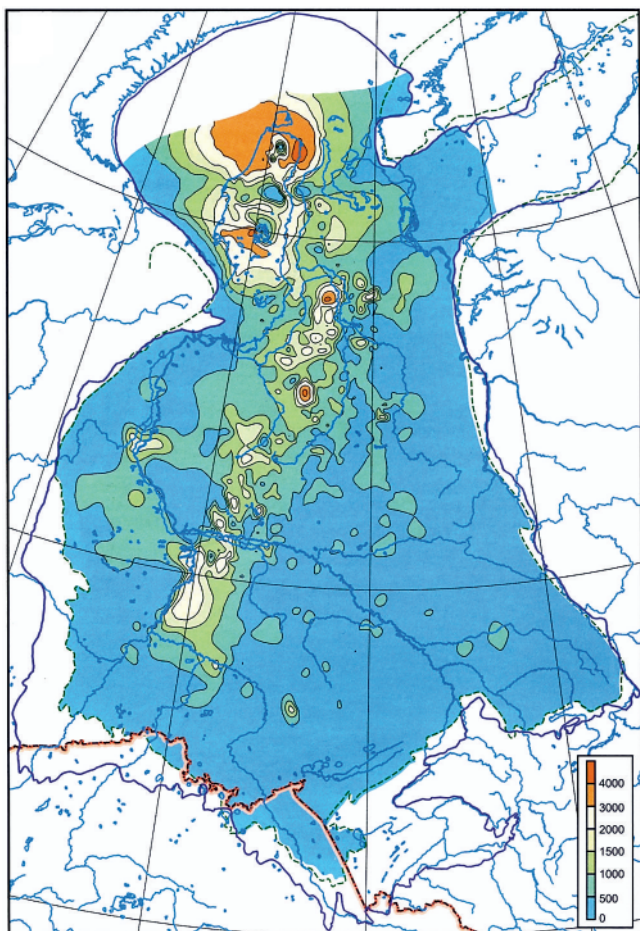
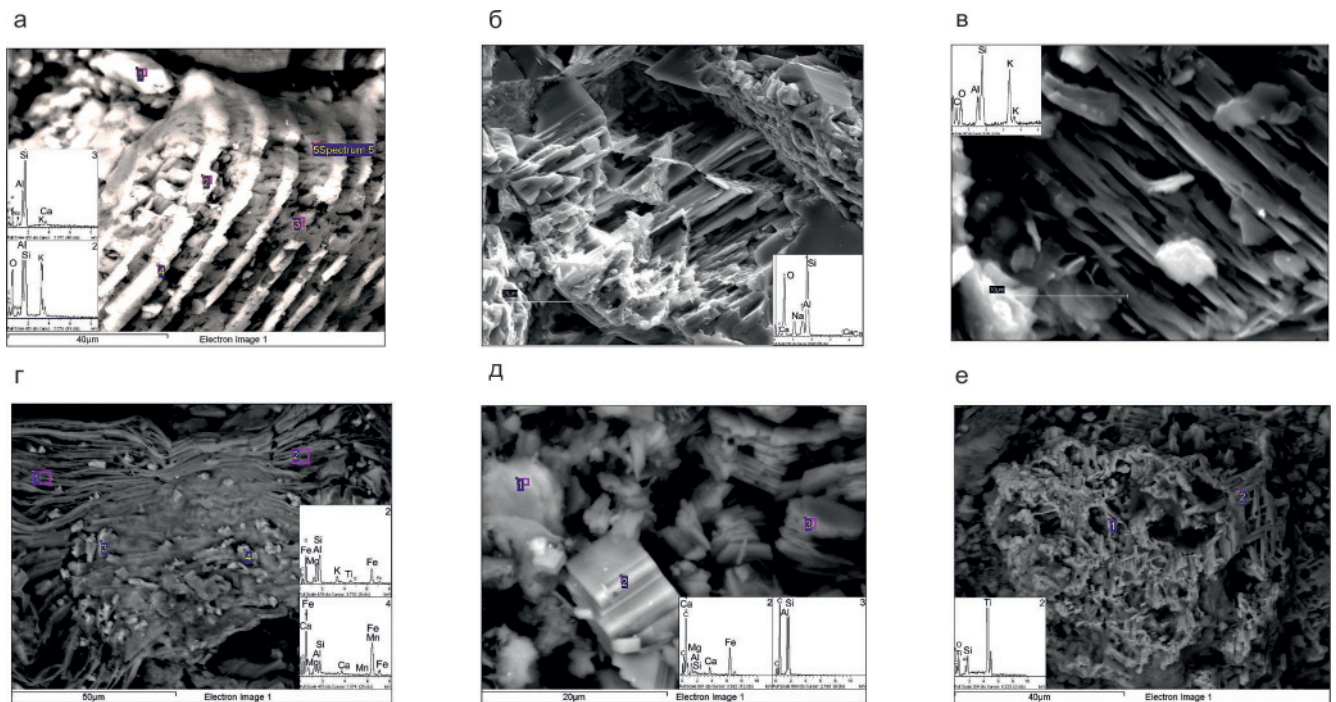


Рис. 6. Содержание (мг/л)  $\text{HCO}_3^-$ -иона в пластовых водах нижнемеловых отложений Западной Сибири (по [3])



**Рис. 7.** Снимки РЭМ пород-коллекторов мелового возраста северной части Западной Сибири, подвергшихся тектоно-гидротермальному воздействию: выщелачивание (а–в, е) и новообразование (г, д) (по [8] с изменениями) а – щелочной полевой шпат (пласт ПК<sub>1</sub>, Ямбургская площадь); б – плагиоклаз (пласт ТП<sub>12–13</sub>, Северо-Парусовая площадь); в – щелочной полевой шпат (пласт БУ<sub>8</sub>, Южно-Парусовая площадь); г – мелкокристаллический сидерит по биотиту (пласт ПК<sub>1</sub>, Ямбургская площадь); д – кристаллы гидротермального сидерита и каолинита (пласт ТП<sub>4</sub>, Северо-Парусовая площадь); е – пертиты рутила, оставшиеся после выщелачивания магнетитового минала из зерна титаномagnetита (пласт ТП<sub>4</sub>, Северо-Парусовая площадь)

По данным [5], содержание изотопа  $\delta C^{13}$  в метане в сеноманских залежах газа Медвежьего и Уренгойского месторождений изменяется от  $-58$  до  $-44,5$  ‰, т. е. в соответствии с указанными критериями он относится преимущественно к биогенному типу с примесью эндогенного.

В работе [21] приводятся интересные и довольно неожиданные результаты пиролиза угля, которые свидетельствуют о том, что изотопный состав углерода изменяется следующим образом:  $\delta C^{13}_{CO} < \delta C^{13}_{CH_4} < \delta C^{13}_{\text{уголь}} < \delta C^{13}_{CO_2}$ . Иначе говоря, самый легкий изотопный состав углерода в продуктах пиролиза имеет не метан, а окись углерода! Вероятно, это объясняется кинетическим изотопным эффектом. Дело в том, что при температурах около  $275$  °С и выше  $CO_2$  разлагается на окись углерода и кислород, причем при снижении давления равновесие еще больше сдвигается в сторону образования  $CO$  и  $O_2$  [9]. Поскольку связи  $C^{12}-O$  при термическом разложении молекул  $CO_2$  рвутся быстрее, чем  $C^{13}-O$ , то вследствие этого отщепляющиеся молекулы  $CO$  обогащаются легким изотопом, а в остающихся целыми молекулах  $CO_2$  накапливается преимущественно тяжелый изотоп  $C^{13}$ .

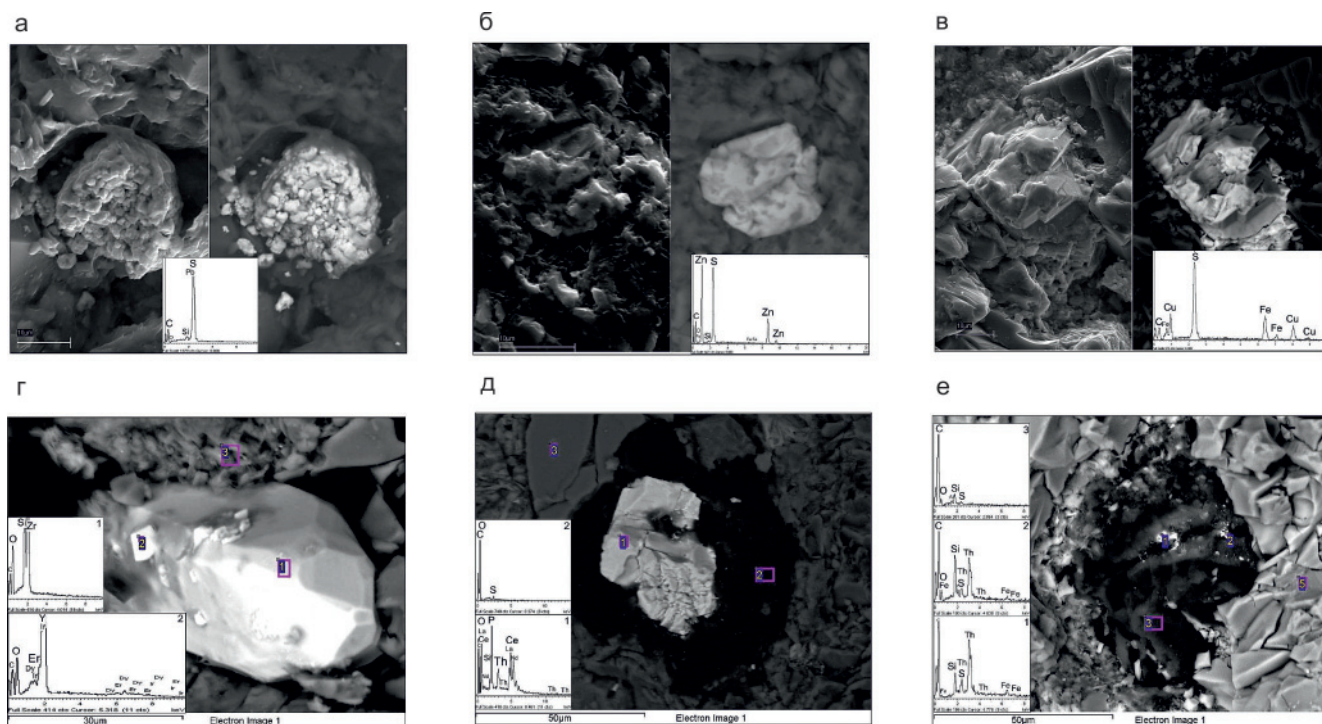
Если допустить, что деструкция и процесс декарбоксилирования  $OB$  происходит под воздействием эндогенных высокоэнтропийных флюидов, в которых помимо воды, уголекислоты, метана и других летучих компонентов обязательно присутствует и водород [4, 14, 17, 26], то можно допустить и воз-

можность протекания процесса Фишера–Тропша с образованием  $УВ$  (включая метан), богатых легким изотопом углерода, унаследованного из участвующей в этой реакции  $CO$  [9].

Можно предположить, что из-за того же кинетического изотопного эффекта и эндогенная  $CO$  также обогащена легким изотопом углерода. Тогда при ее взаимодействии с водородом будут образовываться метан и другие  $УВ$ , содержащие углерод, обогащенный легким изотопом. Поэтому даже эндогенный метан, образовавшийся таким образом, может иметь «легкий» изотопный состав углерода.

Как в рассмотренном ранее механизме биогенной генерации метана из метоксильных групп ( $O-CH_3$ ) лигнина, так и в абиогенном процессе Фишера–Тропша требуется водород. Но если в биогенной модели можно предположить, что водород, необходимый для превращения метоксильных групп в метан, извлекается микроорганизмами из молекул лигнина, то в абиогенной необходим дополнительный источник водорода. Поэтому следует оценить объем водорода, выделяющегося из магматических тел. Для этого, как и в случае магматического метана, воспользуемся данными вулканологов об объемах водорода, выделяющегося с термальных площадок кальдеры Узон – около  $35,6$  тыс.  $m^3/km^2$  [4, 14]. Значит, с площади  $1$  тыс  $km^2$  в год выделится  $35,6$  млн  $m^3$  водорода, и этого количества достаточно для образования в год почти  $95$  млн  $m^3$  абиогенного метана при условии, что из





**Рис. 8.** Снимки РЭМ новообразованных минералов гидротермального происхождения в меловых отложениях севера Западной Сибири: сульфиды (а–в) и редкоземельные силикаты, фосфаты и окислы (г–е) (по [8] с изменениями) а – галенит; б – сфалерит (пласт БУ<sub>14</sub><sup>2</sup>, Юбилейное месторождение); в – халькопирит; г – регенерированное зерно циркона с новообразованными мелкими кристаллами иттриита (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (пласт БУ<sub>8</sub><sup>0</sup>, Южно-Парусовая площадь); д – монацит в тиобитуме (пласт ТП<sub>5-6</sub>, Северо-Парусовая площадь); е – мелкие зерна торита (ThSiO<sub>4</sub>) в тиобитуме (пласт БУ<sub>11</sub>, Ямбургская площадь)

СО и Н<sub>2</sub> образуется только метан без учета других УВ. Иными словами, для возникновения всех залежей газа в ЯНАО описанным способом потребуется всего около 1 млн лет!

Аналогичные расчеты несложно выполнить и для оценки объема эндогенного СО<sub>2</sub>. Они показывают, что со всех трех термических площадок той же кальдеры в год выделяется 6 млн м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup> углекислого газа [14], значит, с площади 1 тыс. км<sup>2</sup> в год выделится примерно 60 млн м<sup>3</sup> СО<sub>2</sub>. Эти оценочные расчеты объемов ювенильной СО<sub>2</sub> (наряду со слабоминерализованными гидротермальными флюидами, в состав которых она входит) позволяют объяснить возникновение отмеченной ранее гидрохимической аномалии в нижнемеловых отложениях [3, 11–13, 18, 19, 22].

Необходимо также ответить на следующие основные вопросы:

1. Каким образом эндогенные высокоэнтальпийные флюиды, отделяющиеся от магматических тел, расположенных в основании фундамента, смогли проникнуть в осадочный чехол и принять участие в формировании гидрохимической аномалии в нижнемеловых пластовых водах?

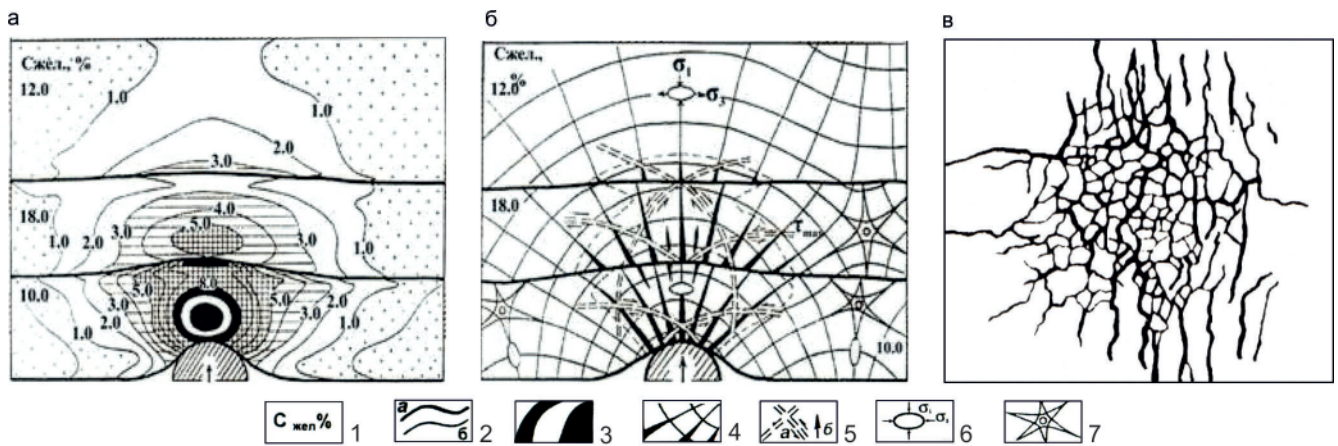
2. Как биогенный метан, образовавшийся преимущественно в нижней части покурской свиты и в более древних отложениях, смог проникнуть через мощный глинистый экран в ее средней части в верхнюю и заполнить сеноманский песчаный коллектор?

3. Почему верхняя часть покурской свиты характеризуется аномально низкими давлениями, а в юрских коллекторах отмечаются аномально высокие, чем объяснить, что наблюдается снижение напора (пластового давления) в северном направлении и рост в том же направлении геотермического градиента в сеноманских отложениях?

Известно, что северная часть фундамента Западной Сибири и собственно сам осадочный чехол разбиты многочисленными тектоническими нарушениями, амплитуда которых составляет от первых десятков до первых сотен метров. Очевидно, что в возникновении перечисленных выше особенностей состава пластовых флюидов, их свойств и формировании УВ залежей не обошлось без влияния тектонических сил. Поэтому попробуем ответить на эти вопросы с помощью простейших тектонофизических моделей.

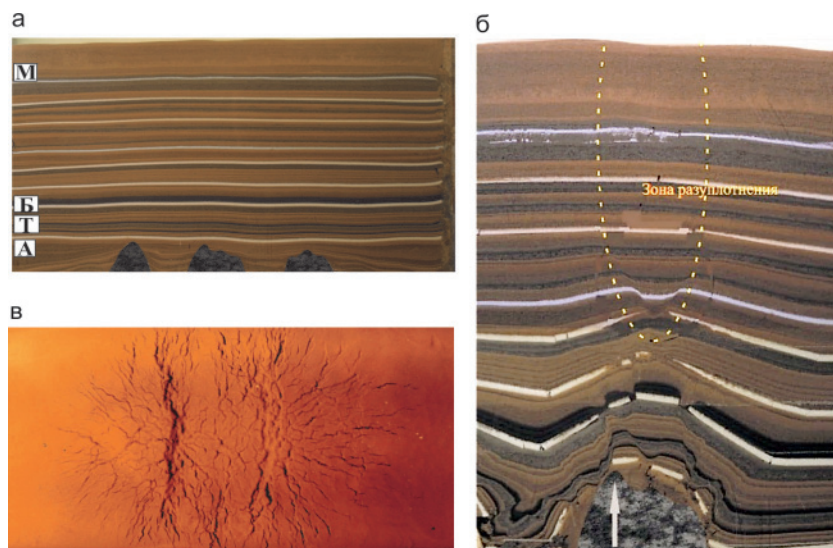
С целью анализа распределения напряжений, прогноза направления и плотности трещин, а также формирования зон разуплотнения (просадки) и смещения осадков вследствие роста поднятий использовались два уже описанных метода тектонофизического моделирования – оптический и двумерный седиментационный. С их помощью проанализируем закономерности формирования напряжений и ориентации трещин (в оптической модели) и смещения осадков и образования дислокаций, а также зоны разуплотнения (в седиментационной).





**Рис. 9.** Оптико-поляризационная модель симметричного поднятия (а, б) и зона дробления, сформировавшаяся над ним в тектоно-седиментационной модели (в) (по [7] с изменениями)

1 – концентрация желатина; 2 – границы между желатиновыми слоями (а), изохромы (уровни касательных напряжений) (б); 3 – максимальные значения изохром (более 8); 4 – траектории нормальных напряжений ( $\sigma_1$ ), их уширения – прогнозируемые трещины; 5 – траектории касательных напряжений ( $\tau_{\max}$ ) (а), направление движения антиклинальных блоков (б); 6 – эллипсоид деформации; 7 – изотропная точка



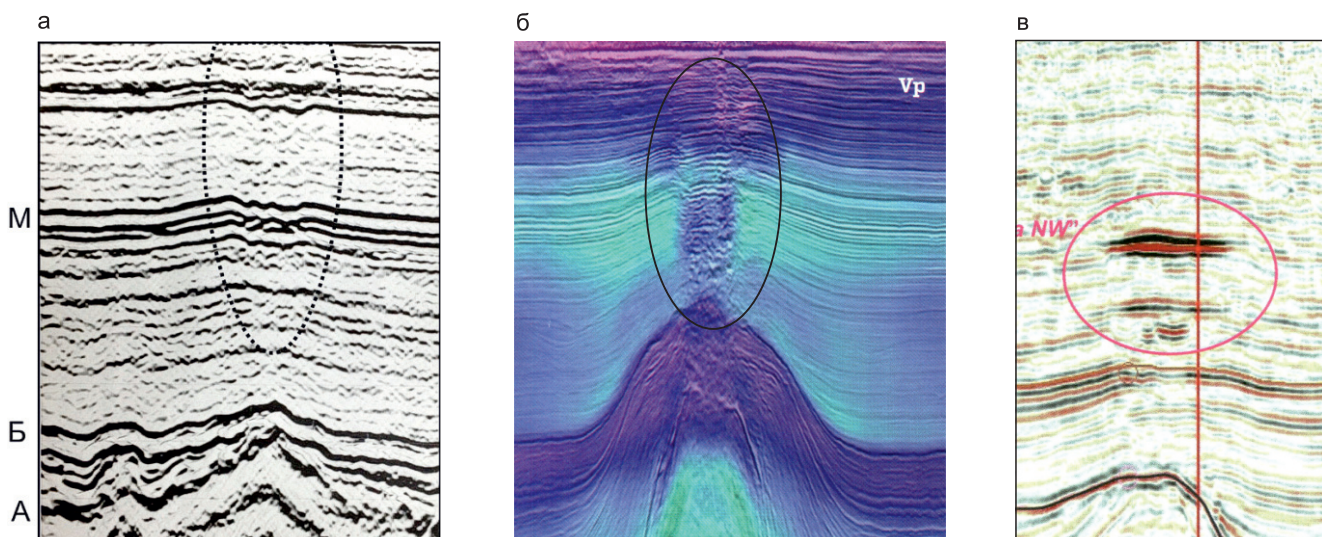
**Рис. 10.** Тектоно-седиментационная модель симметричного поднятия: а – исходное состояние модели; б – после роста центрального поднятия; в – зона просадки (разуплотнения), вышедшая на поверхность модели (по [7])

Начнем рассмотрение с трехслойной оптической модели, в которой моделируется рост симметричного поднятия (рис. 9). Нижний слой имитирует юрские отложения, средний – осадки сортымской и тангаловской свит, верхний – покурскую свиту и перекрывающие ее осадки. Непосредственно над самым поднятием (в «юрских» отложениях) формируется зона сжатия с высокой концентрацией напряжений – более 8 условных единиц (далее по тексту – у. е.). Она постепенно расширяется по направлению вверх до границы с «нижнемеловыми» осадками, в которых также отмечается образование зоны повышенных касательных напряжений (до 5 у. е.), однако в отличие от нижней, являющейся участком сжатия, эта зона представляет собой зону растяжения или разуплотнения (см. рис. 9, а), она проникает также в толщу «покурской» свиты, однако значений напряжений здесь снижается до 2–3 у. е.

Анализ направления изоклин в оптической модели позволил осуществить прогноз ориентации трещинных дислокаций, которые возникают вследствие роста симметричного поднятия. Непосредственно над его вершиной дислокации имеют

средственно над его вершиной дислокации имеют субвертикальную ориентацию, а по мере смещения по крыльям поднятия к его основанию начинают «наклоняться», приобретая все более пологую ориентацию (см. рис. 9, б).

Первыми образуются трещины в зоне сжатия, которые поднимаются вверх по мере роста симметричного поднятия. Затем по мере увеличения напряжений в перекрывающих отложениях (в зоне разуплотнения) также образуются трещины отрыва, которые начинают «расти» преимущественно вниз. В некоторый момент обе зоны трещиноватости соединяются, образуя единую область дробления. Если поднятие имеет достаточно большую амплитуду, то зона дробления проникает и выше в осадки, имитирующие покурскую свиту (см. рис. 9, б). Субвертикальная зона дробления, сформировавшаяся в верхней части седиментационной модели над симметричным поднятием (вид сверху) приведена на рис. 9, в. Следует отметить, что латеральные размеры образующейся зоны дробления заметно превышают размеры поднятия, над которым она обра-



**Рис. 11.** Примеры зон просадки (разуплотнения) на сейсмических разрезах: а – Пальняновская площадь (по [8]); б – переобработанный сейсмический разрез центральной части Северного моря (CGG, 2020); в – средиземноморский шельф Хорватии, «яркие пятна» – залежи газа (по [24])

зается, что было показано ранее при интерпретации оптической модели (см. рис. 9, б).

В седиментационной модели (рис. 10, а) рост поднятия привел к возникновению субвертикальных трещин в компетентных слоях (имеющих белый цвет), а также формированию предсказанной ранее на примере оптической модели, зоны разуплотнения или просадки (см. рис. 10, б). В рассматриваемой модели поднятие имело достаточно большую амплитуду и вытянутую форму, поэтому зона разуплотнения вышла на поверхность модели в форме малоамплитудного грабена с многочисленными опережающими его трещинными дислокациями (см. рис. 10, в).

На рис. 11, а хорошо видна зона разуплотнения, образовавшаяся в результате роста симметричного поднятия [7], а на рис. 11, б, помимо зон разуплотнения, прекрасно выделяются субвертикальные участки «пропаривания» осадков высокоэнтальпийными флюидами, выделившимися из магматического батолита (CGG, 2020). Причем эти флюиды мобилизуют поровую воду, в результате чего и формируются гидротермальные растворы, активно воздействующие на вмещающие их породы. На рис. 11, в в зонах разуплотнения выделяются залежи газа в виде «ярких пятен» [24].

### Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в формировании сеноманских залежей газа северной части Западной Сибири могли участвовать как биогенные источники метана (термофильные метилотрофные метаногены), так и эндогенные. Попробуем оценить их соотношение в сеноманских газовых залежах. Будем считать, что биогенный метан характеризуется содержанием изотопа  $\delta C^{13} = -60\text{‰}$ , а эндогенный  $-23\text{‰}$ . Тогда при минимальном содержании в метане Уренгойского месторождения изотопа  $\delta C^{13}$  ( $-58\text{‰}$ ) концентрация биогенного ме-

тана составит 95 %, а эндогенного – 5 %. В метане Медвежьего месторождения в пробе с максимальным содержанием тяжелого изотопа  $\delta C^{13} = -45\text{‰}$  концентрация биогенного метана составит 60 %, а ювенильного – 40 %.

Здесь, однако, следует обратить внимание на то, что изотопный состав биогенного метана изменяется по мере его генерации метилотрофными анаэробными метаногенами. Первоначально генерируется метан с самым изотопно легким углеродом, а по мере уменьшения его концентрации в составе лигнина образуются молекулы метана с большим содержанием тяжелого изотопа углерода [25], что объясняется в первую очередь «биогенным» кинетическим изотопным эффектом.

С другой стороны, если  $CO_2$ , образующаяся при термическом разложении  $CO_2$  (например, под воздействием высокоэнтальпийных эндогенных флюидов), имеет более «легкий» изотопный состав углерода, чем у термогенного и тем более эндогенного метана, то в результате ее взаимодействия с ювенильным водородом возможно образование молекул метана с высоким содержанием легкого изотопа углерода, близким к биогенному метану. Поэтому изотопный состав углерода, входящего в состав этого генетического типа абиогенного метана, требует дальнейшего изучения, чтобы получить однозначный ответ, насколько он богат «легким» изотопом.

На основе полученных данных попытаемся в первом приближении реконструировать последовательность событий, происходивших в фундаменте, юрских и меловых отложениях вплоть до возникновения гигантских залежей газа в сеноманских песчаниках.

Допустим, что под фундаментом Западно-Сибирской плиты из астеносферы (вероятно, в триасе) поднимался громадный батолит, над которым формировалась региональная зона растяжения (раз-



уплотнения) и, соответственно, просадки, которая представляла собой начинающую формироваться огромную впадину. Плавление подошвенной части коры увеличивало амплитуду «просадки» фундамента. По образующимся субвертикальным трещинам впадина начала заполняться отложениями, которые отделялись от этого супербатолита – сначала магматическими (включая интрузивные и эффузивные породы), затем вулканогенными, а также вулканогенно-осадочными. Позднее (нижняя юра) она наполнялась осадками: первоначально преимущественно континентальными (нижняя–средняя юра), а затем (верхняя юра) – эпиконтинентальным морским бассейном, в котором начали накапливаться морские осадки.

Поскольку поднимающийся супербатолит смещал перекрывающие его породы не только вверх, но и в субгоризонтальном направлении (из-за чего над ним и образуется зона просадки и разуплотнения), то, во-первых, заполнившийся осадками морской бассейн постепенно поднимался выше уровня Мирового океана и начинался цикл континентального накопления осадков, а во-вторых, на его бортах сохранялись или даже формировались новые возвышенности. На западе это были Уральские горы, на востоке – Среднесибирское плоскогорье (вероятно, ранее представлявшее собой горы), которые являлись одними из главных поставщиков терригенного материала для Западно-Сибирского осадочного бассейна (см. рис. 10, б, в).

Последующие смены субконтинентальных и субморских условий осадконакопления, вероятно, связаны с эпейрогеническими и эвстатическими процессами, включая вертикальные перемещения отделяющихся от супербатолита более мелких магматических тел (некоторые ученые называют их плюмами). Именно эти более мелкие магматические тела, отделявшиеся по субвертикальным трещинам от главного супербатолита, в зависимости от их размеров, формировали поднятия различных порядков [7].

Приведенное описание тектонического развития Западно-Сибирского бассейна имеет явные черты геосинклинали. О вероятной геосинклинальной природе бассейна писали в более ранних работах и другие авторы (П. В. Маркевич, 1966; В. Д. Наливкин, Н. В. Шаблинская, 1968; В. С. Бочкарев, 1971 и др.).

Исходя из приведенных данных, самая активная и горячая часть рассматриваемого гипотетического батолита в настоящее время находится в северной части Западно-Сибирской плиты, продолжаясь под ложем Северного Ледовитого океана. Действительно, в южной ее части батолит уже давно начал остывать, о чем свидетельствуют сравнительно невысокие геотермические градиенты и пластовые температуры, за исключением нескольких районов, где, вероятно, тектоно-магматические процессы завершились сравнительно недавно или даже продол-

жаются в настоящее время (Салымский, Красноленинский, Шаимский и другие районы).

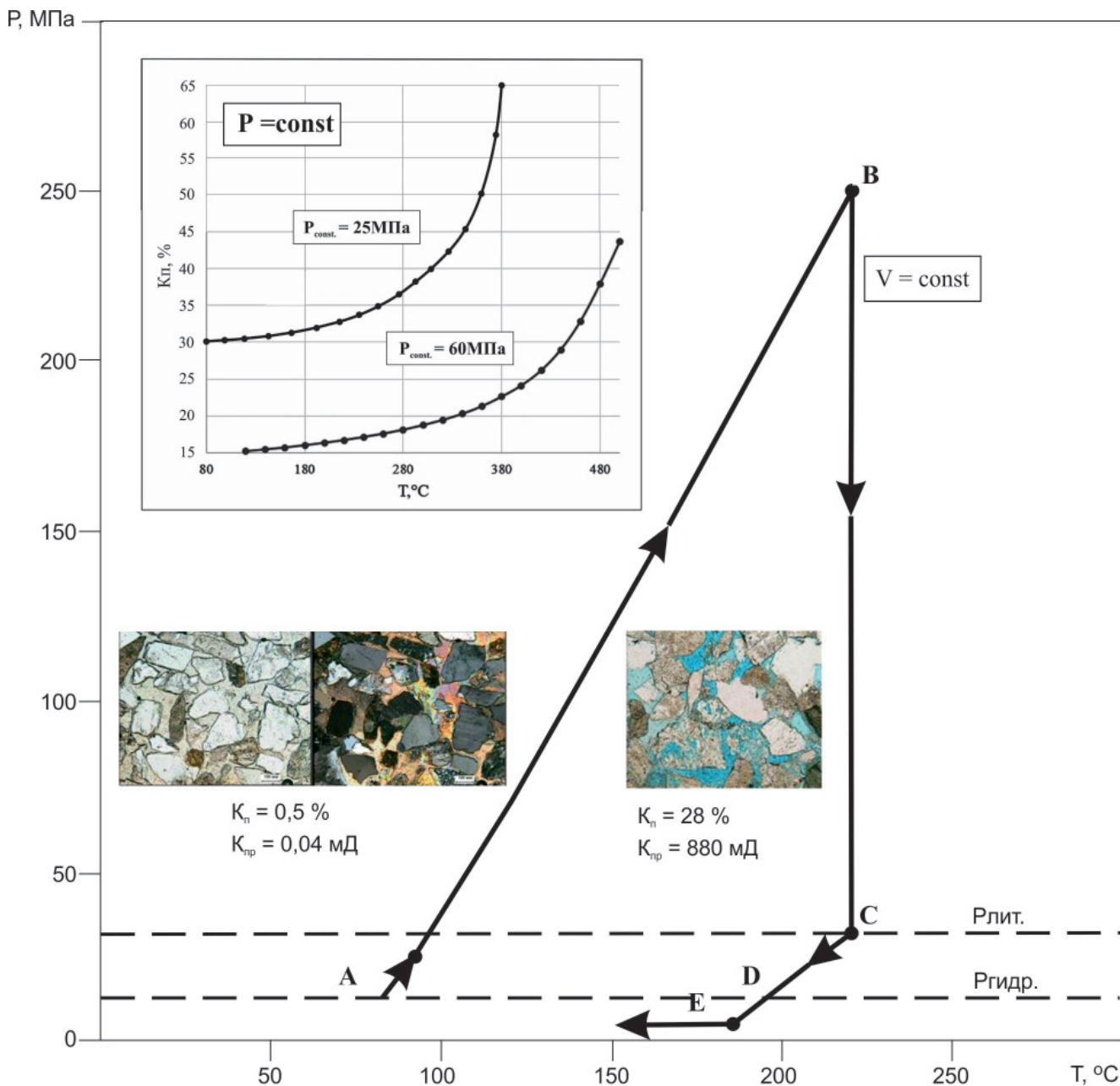
Над антиклинальными магматическими телами в фундаменте Западно-Сибирской плиты, включая рассматриваемую северную часть, возникают напряжения, и если они превышают прочность перекрывающих пород, в последних образуются субвертикальные трещины. Вследствие падения давления по этим трещинам из магматических тел выделяются высокоэнтальпийные флюиды, состоящие главным образом из  $H_2O$ , в гораздо меньшем количестве –  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $HCl$ ,  $H_2S$  и другие летучие компоненты [4, 14, 17].

Поскольку юрские отложения находятся в зоне сжатия и обладают низкими фильтрационно-емкостными свойствами, то основная часть отделившихся от магматических тел флюидов проходит «транзитом» по возникшим субвертикальным трещинам через эти отложения и попадает в зону растяжения (разуплотнения), формирующуюся в подошвенной части меловых отложений (см. рис. 9, а, б, рис. 10, б). В данной зоне осуществляется «разгрузка» основной части высокоэнтальпийных флюидов и растворение в поровых водах хорошо растворимых компонентов ( $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ ). Происходит вытеснение и разбавление пластовых вод низкоминерализованным (около 1–3 г/л [11, 14, 17]) кислым гидротермальным флюидом, который растворяет неустойчивые в таких условиях обломочные зерна (в основном плагиоклазы и мафические минералы), а также часть глинистых минералов, формируя дополнительную вторичную емкость в осадках (см. рис. 7) [7–9]. Первоначально кислые эндогенные флюиды нейтрализуются, резко снижается минерализация пластовых вод, выделяются гидротермальные сульфиды (см. рис. 8) и сульфаты, а в результате растворения  $CO_2$  пластовые воды становятся гидрокарбонатными (см. рис. 6) [3, 11–13, 15, 18, 19, 22]. Остальные слабо растворимые компоненты ( $CH_4$ ,  $H_2$  и  $CO$ ) по зонам дробления проникают в перекрывающие верхнемеловые осадки, включая сенноманские песчаники, и разгружаются в них.

Отмеченные аномально низкие пластовые давления в верхнемеловых отложениях обусловлены двумя главными причинами: 1) они находятся в зоне разуплотнения; 2) проникшие в них высокоэнтальпийные флюиды, превратившиеся в гидротермальные растворы с достаточно высокой температурой (вероятно, около 200–300 °С), начали остывать, что привело к возникновению депрессионной зоны, в которую из окружающих ее участков начали «засасываться» вода и УВ (преимущественно метан из-за его высокой фазовой проницаемости) [9].

Описываемая ситуация представлена на графике T–P (рис. 12), построенном по данным [20] при условии  $V = \text{const}$ . В результате проникновения в пласт (ПК<sub>1</sub>) гидротермального флюида, имевшего, например, первоначально температуру 80 °С (точка А), при температуре 220 °С резко (до 250 МПа!)





**Рис. 12.** P–T диаграмма, описывающая поведение поровой воды при ее нагреве глубинным высокоэнтальпийным флюидом и последующем ее охлаждении (сеноманские отложения, пласт ПК<sub>1</sub>)

На врезках: диаграмма  $K_n$ – $T$ , которая позволяет оценить изменение пористости гранулярных коллекторов (первоначальная пористость и литостатическое давление в ачимовской толще 15 % и 60 МПа, в сеноманских отложениях 30 % и 25 Мпа соответственно); фотографии петрографических шлифов песчаников из зон разуплотнения, в которые внедрялись гидротермальные флюиды кислого состава: справа – активно выщелачивавшие зерна полевых шпатов, слева – содержавшие высокую концентрацию  $CO_2$ , что приводило к заполнению порового пространства гидротермальным кальцитом

увеличивается поровое давление (точка В), а это, в свою очередь, вызовет гидроразрыв пласта и снижение порового давления до литостатического (точка С). Последующее охлаждение пластового флюида примерно до 190 °С приведет к восстановлению гидростатического давления (точка D), а снижение пластовой температуры до 180 °С (точка E) приведет к падению пластового давления до 5–6 МПа и вызовет вскипание порового флюида с разделением первоначально гомогенной водной фазы на две – воду и водяной пар с растворенными в нем газами

(см. рис. 12). Дальнейшее охлаждение вызовет конденсацию пара и возникновение локальной зоны с крайне низкой минерализацией пластовой воды, о чем уже упоминалось.

Резкое падение давления вызовет формирование мощной депрессионной зоны, в которой пластовое давление ниже гидростатического для этих глубин на 6–7 МПа. В эту зону по субвертикальным трещинам из нижележащих пластов благодаря высокой фазовой проницаемости в первую очередь поступает именно метан биогенного (низи

покурской свиты) и, возможно, эндогенного происхождения. Благодаря высокой подвижности он вместе с водородом на самой ранней стадии уносится вверх по субвертикальным разломам, разгружаясь в наиболее проницаемых и высокеемких сеноманских песчаниках, в которых к тому же была сформирована мощная депрессионная зона (см. рис. 12).

Чтобы понять, насколько может измениться пористость пород, в которые проникнет высокоэнталпийный эндогенный флюид, рассмотрим зависимость пористости ( $K_n$ ) от температуры ( $T$ ) при условии, что объем поровой воды не изменяется, т. е. без учета объема флюида, внедряющегося в поровое пространство осадков (см. вставку на рис. 12).

В качестве исходных условий для ачимовских отложений примем пористость равной 15 %, пластовую температуру ( $T_{пл}$ ) – 120 °С, литостатическое давление ( $P_{лит}$ ) – 60 МПа. Тогда при повышении  $T_{пл}$  до 140 °С произойдет гидроразрыв пласта, а пористость увеличится всего в 1,02 раза и составит 15,3 % (см. вставку на рис. 12). Начиная с температуры около 340 °С наблюдается резкое (до 21 %) увеличение пористости, а при температурах 420 и 480 °С пористость пород достигнет 26,5 и 37,5 % соответственно.

В случае проникновения высокоэнталпийного флюида в сеноманские отложения (примем для оценочных расчетов  $K_n = 30 \%$ ,  $T_{пл} = 80 \text{ °С}$  и  $P_{лит} = 25 \text{ МПа}$ ) гидроразрыв пласта произойдет уже при  $T_{пл} = 90 \text{ °С}$ , при этом пористость увеличится всего до 30,7 % (см. вставку на рис. 12). Пористость резко вырастет при  $T_{пл} = 260\text{--}280 \text{ °С}$ , при этом пористость пород-коллекторов составит около 38 %.

В случае дальнейшего роста температуры, например до 340–360 °С, обломочные зерна полностью перестанут контактировать друг с другом: коллектор превратится в «кипящий слой», а его пористость достигнет 50 % (см. вставку на рис. 12).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при тектоно-гидротермальном воздействии на осадочные породы не только породы-коллекторы, но даже глинистые экраны на некоторое время становятся проницаемыми, и это способствует беспрепятственной миграции флюидов в вертикальном и горизонтальном направлениях и формировании залежей УВ.

Следует обратить внимание на то, что в зонах разуплотнения могут протекать различные процессы. Когда высокоэнталпийные гидротермальные флюиды, поступающие в зону разуплотнения, имеют кислый состав, наряду с «разрыхлением» коллекторов происходит интенсивное выщелачивание неустойчивых минералов. В результате формируются вторичные коллекторы с очень высокими фильтрационно-емкостными свойствами (см. вставку на рис. 12 с фотографией петрографического шлифа (справа), прокрашенного голубой смолой).

Если же в возникшую зону разуплотнения, поровое пространство которой было заполнено пластовой водой жесткого хлоркальциевого типа с высоким рН, проникают гидротермальные флюиды с высокой концентрацией  $\text{CO}_2$ , то практически все поровое пространство песчаного коллектора заполняется эпигенетическим гидротермальным кальцитом, а обломочные зерна «плавают» в нем (см. вставку на рис. 12 с фотографиями шлифа (слева), выполненными без анализатором и с ним).

Очень низкое содержание водорода в сеноманских газовых залежах, вероятно, объясняется его участием в реакциях с метоксильными группами при образовании молекул органогенного метана и/или с эндогенной СО также с образованием метана и других УВ неорганического происхождения. Не исключено, что из-за очень маленьких размеров молекул водорода его «избытки» рассеялись в осадочной толще и/или выделились по возникшим в зоне разуплотнения микротрещинам в атмосферу (см. рис. 10, в).

Не следует также забывать, что проникновение по зонам дробления высокоэнталпийных флюидов вызывает активную генерацию нафтидов из ОВ, входящего в состав осадочной толщи, а кроме того, формирование многочисленных микротрещин флюидоразрыва вследствие превышения объема образующихся нафтидов объема исходного ОВ, а также гидроразрыва вследствие увеличения объема поровой воды в результате ее нагрева (см. рис. 12). Все это способствует резкому увеличению проницаемости пород в зоне тектоно-гидротермального воздействия, что, в свою очередь, благоприятствует быстрому формированию УВ залежей.

Надежным экраном для сеноманских залежей газа, наряду с глинистыми толщами кайнозойского возраста, является мощная зона вечномерзлых пород, толщина которых на севере Западной Сибири достигает 400 м и более, а также породы, поровое пространство которых заполнено газогидратами. Их уникальные изолирующие свойства обусловлены тем, что при создании в указанных отложениях даже очень высоких напряжений, обусловленных, например, ростом поднятий или тектоническими движениями, формируются сколово-сдвиговые дислокации, а не трещины отрыва. Первый вид дислокаций образуется в пластичных телах по направлениям касательных напряжений и выражается в скольжении разрушенных фрагментов относительно друг друга (т. е. проявляются они в виде поверхностей и «зеркал скольжения») без образования «зияющих» трещин, которые возникают при образовании второго типа дислокаций, формирующихся в направлении нормальных напряжений в компетентных породах (см. рис. 9, б и 10, б).

Активность магматического супербатолита увеличивается в северном направлении, что, как уже отмечалось, проявляется в росте геотермического градиента, концентрации  $\text{CO}_2$  (в виде гидро-

карбонат-иона) в пластовых водах нижнего мела. Вследствие этого уменьшается пластовое давление, наклоняются ВНК (из-за сформировавшихся сравнительно «недавно» зон разуплотнения и термодепрессии). Значит, в случае продолжения распространения сеноманских песчаников в этом направлении можно ожидать открытия самых молодых залежей газа и под ложем Северного Ледовитого океана на значительном удалении от берега в его дальней акватории.

### Выводы

1. Основными генераторами нафтидов в северной части Западной Сибири являются юрские отложения, а коллекторами – неокомские, однако генерированных юрскими осадками нафтидов явно недостаточно, чтобы заполнить неокомские породы-коллекторы, и в особенности высоконеоманские песчаники.

2. Образование биогенного метана в покурской свите, вероятнее всего, происходило в результате отщепления метоксильных групп, входящих в состав лигнита, который содержится в этих отложениях, термофильными метилотрофными анаэробными микроорганизмами.

3. Накопленные к настоящему времени факты свидетельствуют также о непременном участии в формировании залежей газа в сеноманских осадках тектоно-гидротермальных процессов, включая также поступление в составе высокоэнталийных флюидов эндогенного метана вместе с другими летучими компонентами ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  и др.). Вопрос заключается лишь в определении соотношения объемов биогенного и абиогенного метана и других УВ в составе сеноманских залежей газа.

4. Необходимо провести комплекс научно-исследовательских работ с целью установления изотопного состава  $\text{CO}$ , возникающей в результате термического разложения  $\text{CO}_2$  на  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ , а также определения количества метана и других УВ, образующихся в гидротермальных условиях при взаимодействии  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  (природный процесс Фишера–Тропша), так как в промышленности для этих целей используются катализаторы.

5. Тектоно-гидротермальные процессы активизировали генерацию нафтидов из ОВ, входящего в состав осадочного чехла, способствовали возникновению путей миграции ювенильных и образовавшихся в осадках (биогенных) нафтидов, а также создавали необходимые условия для формирования залежей газообразных и жидких УВ.

6. Возраст тектоно-гидротермальной активности недр уменьшается по направлению с юга на север, поэтому, вероятно, под ложем Северного Ледовитого океана находятся самые молодые залежи газа в сеноманских отложениях.

7. Для оптимизации поисково-разведочных работ на нефть и газ в северной части Западной Сиби-

ри следует использовать метод комплексирования данных сейсморазведки и результаты тектонофизического моделирования, выполненного на их основе с целью выделения возможных зон разуплотнения, заполненных УВ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алексеев Ф. А., Лебедев В. С., Овсянников В. М.** Изотопный состав углерода газов биохимического происхождения. – М.: Недра, 1973. – 89 с.

2. **Галимов Э. М.** Геохимия стабильных изотопов углерода – М.: Недра, 1968. – 226 с.

3. **Гидрохимическая зональность юрских и меловых отложений Западно-Сибирского бассейна** / Б. П. Ставицкий, А. Р. Курчиков, А. Э. Конторович, А. Г. Плавник // Геология и геофизика. – 2004. – № 7 (45). – С. 826–832.

4. **Дымкина Л. Г.** Спонтанные газы кальдеры Узон (Камчатка) // Геология и геофизика. – 1986. – № 12. – С. 22–28.

5. **Зорькин Л. М.** Геохимия газов пластовых вод нефтегазоносных бассейнов. – М.: Недра, 1973. – 404 с.

6. **Зубков М. Ю.** Использование модифицированного метода материального баланса в комплексе с пиролизом для оценки нефтегенерационных свойств баженовской свиты (Западная Сибирь) // Геохимия. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 1–22.

7. **Зубков М. Ю.** Применение методов экспериментальной тектоники в нефтяной геологии на примере месторождений Западной Сибири // Геотектоника. – 2019. – № 3. – С. 92–109.

8. **Зубков М. Ю.** Тектоногидротермальные процессы в меловых отложениях Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 2019. – № 1. – С. 7–26.

9. **Зубков М. Ю.** Экспериментальное моделирование процесса взаимодействия гидротермальных флюидов с юрскими отложениями Западно-Сибирского бассейна (система  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ ) // Геология нефти и газа. – 2020. – № 5. – С. 95–112.

10. **Зубков М. Ю., Маринин В. И., Облеков Г. И.** Степень катагенеза, а также соотношение нефтегенерационных и емкостных свойств юрских и неокомских отложений Медвежьего и Уренгойского месторождений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2005. – № 8. – С. 18–33.

11. **Киреева Т. А., Буданова Д. И.** Роль вертикальной миграции высокотемпературных флюидов в формировании пластовых вод нефтегазовых месторождений на севере Западно-Сибирского бассейна // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. – 2013. – № 3. – С. 38–46.

12. **Кротова В. А.** Некоторые черты сходства и различия бассейнов с промышленной нефтеносностью // Сов. геология. – 1973. – № 7. – С. 74–82.

13. **Кругликов Н. М., Нелюбин В. В., Яковлев О. Н.** Гидрогеология Западно-Сибирского неф-



тегазоносного мегабассейна и особенности формирования залежей УВ. – Л.: Недра, 1985. – 280 с.

14. **Мархинин Е. К.** Вулканизм. – М.: Недра, 1985. – 288 с.

15. **Нелюбин В. В.** Гидрогеологические условия крупнейших газовых месторождений севера Западной Сибири: автореф. дис. ... к. г.-м. н. – Тюмень, 1974. – 33 с.

16. **Озерова Н. А.** Ртутная дегазация Земли // Докл. АН СССР. – 1978. – Т. 239, № 2. – С. 450–453.

17. **Происхождение** спонтанных газов и термальных вод современной рудообразующей гидротермальной системы Узон на Камчатке по изотопным данным / И. П. Луговая, Г. А. Карпов, В. Н. Загнитко, Ф. И. Березовский // Сов. геология. – 1987. – № 10. – С. 99–107.

18. **Розин А. А.** Подземные воды Западно-Сибирского артезианского бассейна и их формирования. – Новосибирск: Наука, 1977. – 102 с.

19. **Розин А. А., Сердюк З. Я.** Преобразование состава подземных вод и пород Западно-Сибирской плиты под воздействием глубинного углекислого газа // Литология и полезные ископаемые. – 1970. – № 4. – С. 102–113.

20. **Справочник** физических констант горных пород / под ред. С. Кларка-мл. – М.: Мир, 1969. – 544 с.

21. **Тараник А. А.** Геохимические показатели участков долговременной добычи угольного метана как самостоятельного источника энергии на примере месторождений Донбасса // Газовая промышленность. – 2017. – № 7 (755). – С. 24–27.

22. **Усачев В. Д.** Моделирование водонапорной системы сеноманской залежи по данным разработки и промысловой геофизики (на примере Ямбургского НГКМ) // НТВ «Каротажник». – 2016. – № 270. – С. 75–87.

23. **Уайт Д. Е.** Месторождения ртути и цветных металлов, связанных с термальными источниками // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. – М.: Мир, 1970. – С. 479–528.

24. **Gas potential evaluation offshore Croatia to trigger renewed exploration** / V. Zucconi, V. Memmo, M. Krpan, et al. // FIRST BREAK. – 2019. – Vol. 37, no. 11. – P. 85–91.

25. **Methoxyl** stable isotopic constraints on the origins and limits of coal-bed methane / M. K. Lloid, E. Trembath-Reichert, R. S. Dawson, et al. // Science. – 2021. – Vol. 374 (6569). – P. 894–897.

26. **Welhan J. A., Craig H.** Methan and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids // Geophys. Res. Lett. – 1979. – Vol. 6, no. 11. – P. 829–831.

## REFERENCES

1. Alekseev F.A., Lebedev V.S., Ovsyannikov V.M. Izotopnyy sostav ugleroda gazov biokhimicheskogo proiskhozhdeniya [Isotope composition of carbon in gases of biochemical origin], Moscow, Nedra Publ., 1973. 89p. (In Russ.).

2. Galimov E.M. *Geokhimiya stabilnykh izotopov ugleroda* [Geochemistry of stable carbon isotopes]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 226 p. (In Russ.).

3. Stavitskiy B.P., Kurchikov A.R., Kontorovich A.E., Plavnik A.G. [Vertical and lateral hydrochemical zonation, typification of underground waters of the West Siberian Basin]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy – Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2006, no. 5–6, pp. 58–84. (In Russ.).

4. Dymkina L.G. [Spontaneous gases of the Uzon caldera (Kamchatka)]. *Geologiya i geofizika*, 1986, no. 12, pp. 22–28. (In Russ.).

5. Zorkin L.M. *Geokhimiya gazov plastovykh vod neftegazonosnykh basseynov* [Geochemistry of gases in formation waters of oil and gas basins]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 404 p. (In Russ.).

6. Zubkov M.Yu. [Application of the modified method of material balance in combination with pyrolysis in estimating the hydrocarbon generation properties of the Bazhenov Formation, Western Siberia]. *Geokhimiya – Geochemistry International*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 171–190.

7. Zubkov M.Yu. Application of experimental tectonic methods in petroleum geology on the examples of deposits in Western Siberia. *Geotektonika – Geotectonics*, 2019, vol. 53, no. 3, pp. 383–398.

8. Zubkov M.Yu. [Tectonic and hydrothermal process in Cretaceous formations of the Western Siberia]. *Geologiya nefti i gaza – Russian Oil and Gas Geology*, 2019, no. 3, pp. 7–26. (In Russ.).

9. Zubkov M.Yu. [Experimental simulation of the process of hydrothermal fluids interaction with the Jurassic deposits of the West Siberian Basin (H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub> system)]. *Geologiya nefti i gaza – Russian Oil and Gas Geology*, 2020, no. 5, pp. 95–112. (In Russ.).

10. Zubkov M.Yu., Marinin V.I., Oblekov G.I. [Stage of catagenesis, and relationships between oil-generation and capacity properties of Jurassic and Neocomian deposits of the Medvezhye and Urengoykoye deposits]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy – Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2005, no. 8, pp. 18–33. (In Russ.).

11. Kireeva T.A., Budanova D.I. [The role of vertical migration of high-temperature fluids in the genesis of formation waters in oil-gas fields in the north of the Western Siberian Basin]. *Vestnik MGU. Seriya 4. Geologiya – Moscow University Geology Bulletin*, 2013, no. 3, pp. 38–46. (In Russ.).

12. Krotova V.A. [Some similarities and differences between basins with commercial oil content]. *Sovetskaya geologiya*, 1973, no. 7, pp. 74–82. (In Russ.).

13. Kruglikov N.M., Nelyubin V.V., Yakovlev O.N. *Gidrogeologiya Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo megabasseyna i osobennosti formirovaniya zalezhey UV* [Hydrogeology of the West Siberian petroleum megabasin and formation features of hydro-



carbon fields]. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 280 p. (In Russ.).

14. Markhinin E.K. *Vulkanizm* [Volcanism]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 288 p. (In Russ.).

15. Nelyubin V.V. *Gidrogeologicheskiye usloviya krupneyshikh gazovykh mestorozhdeniy severa Zapadnoy Sibiri. Avtoref. kand. dis.* [Hydrogeological conditions of fields in the largest gas north of Siberia. Author's abstract of PhD thesis]. Tyumen, 1974. 33 p. (In Russ.).

16. Ozerova N.A. [Mercury degassing of Earth]. *Doklady AN SSSR – Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences, Earth Science sections*, 1978, vol. 239, no. 2, pp. 450–453. (In Russ.).

17. Lugovaya I.P., Karpov G.A., Zagnitko V.N., Bere-zovskiy F.I. [Origin of spontaneous gases and thermal waters in the modern ore-forming hydrothermal Uzon system in Kamchatka according to isotopic data]. *Sovetskaya geologiya*, 1987, no. 10, pp. 99–107. (In Russ.).

18. Rozin A.A. *Podzemnyye vody Zapadno-Sibirskogo artezianskogo basseyna i ikh formirovaniye* [Groundwaters of the West Siberian artesian basin and their formation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 102 p. (In Russ.).

19. Rozin A.A., Serdyuk Z.Ya. [Transformation of the subsurface water composition and lithology of the West Siberian Platform under the influence of deep-earth carbon dioxide]. *Litologiya i poleznyye iskopayemye*, 1970, no. 4, pp. 102–113. (In Russ.).

20. Klark S. *Spravochnik fizicheskikh konstant gornyykh porod* [Handbook of physical constants of rocks]. Moscow, Mir Publ., 1969. 544 p. (In Russ.).

21. Taranik A.A. [Geochemical characteristics of fields for the production of coal bed methanes as an independent source of energy illustrated by Donbass fields]. *Gazovaya promyshlennost – Gas Industry of Russia*, 2017, no. 7 (755), pp. 24–27. (In Russ.).

22. Usachev V.D. [Simulation of water-pressure system of Cenomanian pool from development and production logging data (on the example of Yamburg oil and gas condensate field)]. *Karotazhnik*, 2016, no. 12 (270), pp. 75–87. (In Russ.).

23. White D.E. [Deposits of mercury and non-ferrous metals associated with thermal springs]. *Geokhimiya gidrotermalnykh rudnykh mestorozhdeniy* [Geochemistry of hydrothermal ore deposits]. Moscow, Mir Publ., 1970, pp. 479–528. (In Russ.).

24. Gas potential evaluation offshore Croatia to trigger renewed exploration / V. Zucconi, V. Memmo, M. Krpan, et al. *FIRST BREAK*, 2019, vol. 37, no. 11, pp. 85–91.

25. Methoxyl stable isotopic constraints on the origins and limits of coal-bed methane / M.K.Lloid, E.Trembath-Reichert, R.S.Dawson, et al. *Science*, 2021, vol 374 (6569), pp. 894–897.

26. Welhan J. A., Craig H. Methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids. *Geophys. Res. Lett.*, 1979, vol. 6, no. 11, pp. 829–831.

© М. Ю. Зубков, 2022