



К ВОПРОСУ О ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГИДРАТОВ МЕТАНА В ОБЛАСТЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

А.Д. Дучков¹, Л.С. Соколова¹, М.Н. Железняк², Д.Е. Аюнов¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия,
e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru, fe1956@mail.ru

Поиски скоплений гидратов метана ведутся в северных районах Сибири уже более 50 лет. За это время не удалось достоверно (с извлечением гидратосодержащего ядра) выявить ни одного месторождения метангидратов даже в породах хорошо изученного бурением Западно-Сибирского осадочного бассейна. На примере открытия двух месторождений гидратов метана в Канаде и Китае показано, что для решения проблемы необходимо проведение специально организованных и технически обеспеченных буровых работ на предварительно выделенных перспективных участках. Впервые выполнена оценка параметров зоны стабильности гидратов метана в осадочном чехле Вилюйской синеклизы.

Западно-Сибирский бассейн, Вилюйская синеклиза, криолитозона, гидраты метана, зоны стабильности гидратов метана, месторождения гидратов метана в Канаде и Китае

TO THE QUESTION ABOUT THE SEARCH FIELDS OF METHANE HYDRATES IN THE AREAS OF PERMAFROST DISTRIBUTION

A.D. Duchkov¹, L.S. Sokolova¹, M.N. Zheleznyk², D.E. Ayunov¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya St., 36, Yakutsk, 677010, Russia,
e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru, fe1956@mail.ru

The search for methane hydrate accumulations has been conducted in the Northern regions of Siberia for more than 50 years. During this time, it failed reliably (with the rise of hydrate-containing core) taken from the borehole to discover any deposits of methane hydrates even in the rocks of the Western Siberian basin, which has been well studied by drilling. On the example of the discovery of two methane hydrates deposits in Canada and China, it is shown that to solve the problem it is necessary to conduct specially organized and technically secured drilling operations on the pre-selected promising areas. For the first time, the parameters of the methane hydrates stability zone in the sedimentary cover of the Vilyuysk syncline were estimated.

The West Siberian basin, the Vilyuy syncline, permafrost, methane hydrates, stability zone of methane hydrates, deposits of methane hydrates in Canada and China

ВВЕДЕНИЕ

Гидраты углеводородных газов (в основном метана, CH_4) широко распространены в природе. Необходимым условием образования и сохранности природных газогидратов является наличие подходящих давления и температуры (Т), а также достаточного количества воды и свободного (или растворенного в воде) газа – гидратообразователя. Такие условия реализуются в осадочных породах, охлажденных криолитозоной (далее – вечная мерзлота, многолетнемерзлые породы), и в донных осадках глубоких акваторий [Истомин, Якушев, 1992]. Интерес к скоплениям природных гидратов связан в основном с их потенциальным энергетическим ресурсом [Makogon et al., 2007]. Так, в недавнем сообщении ТАСС говорится, что «по оценкам некоторых организаций, прежде всего Газпром ВНИИГАЗ, ресурсы метана в газогидратах на территории РФ составляют от 100 до 1000 трлн кубометров, в арктической зоне, в том числе морях, – до 600–700 трлн кубометров, но это очень приблизительно» [Горючий лед..., 2018]. Действительно, этот прогноз (как и многие другие) является весьма приблизительным, так как пока даже в пределах хорошо изученной бурением северной части Западно-Сибирской плиты выявлены только отдельные косвенные признаки присутствия газогидратов в верхних горизонтах мезозойских отложений (что справедливо и для Мессояхского газового месторождения). Эти признаки нигде в Сибири не подтверждены поднятием при бурении гидратосодержащего керна. Кстати, подобная ситуация характерна и для других областей развития криолитозоны. К настоящему времени открыто всего несколько месторождений гидратов метана в арктической части Северо-Американского континента (прибрежные районы Канады и США), а также в высокогорном Тибете [Scientific results..., 2005; Song et al., 2014]. Более продуктивными оказались поиски скоплений гидратов метана в донных отложениях морей и глубоких озер. Посредством бурения и отбора керна грунтовыми трубками уже выявлено более 200 скоплений гидратов в поддонных и более глубоких осадках, в том числе и в Сибирском регионе (Охотское море, оз. Байкал) [Mazurenko, Soloviev, 2003]. В данной статье обсуждается сложившаяся ситуация с прогнозированием скоплений гидратов метана в областях распространения криолитозоны.

ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНАХ

В геологических разрезах природные газовые гидраты и их скопления могут образовываться только в определенных слоях горных пород, в которых существуют необходимые для формирования газовых гидратов условия (низкие температуры и высокие давления). Эти слои называются зонами стабильности гидратов (ЗСГ). Современные ЗСГ в континентальных породах Северного полушария сформировались при похолодании климата в плейстоцене и возникновении в связи с этим криолитозоны. Образование и развитие зон стабильности гидратов на континентах в целом повторяют эволюцию криолитозоны, при изменении контура мерзлого слоя изменяются и параметры ЗСГ. Эти зоны не имеют четких литологических границ. ЗСГ образуются во всех охлажденных разрезах, однако, с точки зрения прогноза, интерес представляют только расположенные в водонасыщенных осадочных бассейнах (например, в мезозойских впадинах Сибирского региона). Поисковое значение зон стабильности гидратов весьма велико, так как только в их пределах могут находиться значительные запасы газа в гидратной форме.

Из вышесказанного следует, что для прогнозирования скоплений газогидратов в осадочных бассейнах необходимо, в первую очередь, выяснить расположение в их разрезах современных границ ЗСГ соответствующего газа. Для этого надо иметь геотермическую информацию (термограммы или площадные распределения температуры на глубинах до 2–3 км) и фазовые диаграммы для систем «газ-вода». В наших расчетах границ зон стабильности гидратов метана и углекислого газа в породах Западно-Сибирского бассейна и Вилюйской синеклизы мы использовали диаграммы из работ [Sloan, 1998; Истомин, Якушев, 1992; Scientific results..., 2005; Якуцени, 2013], на основании которых были составлены сводные графики фазовых диаграмм, представленные на рис. 1.

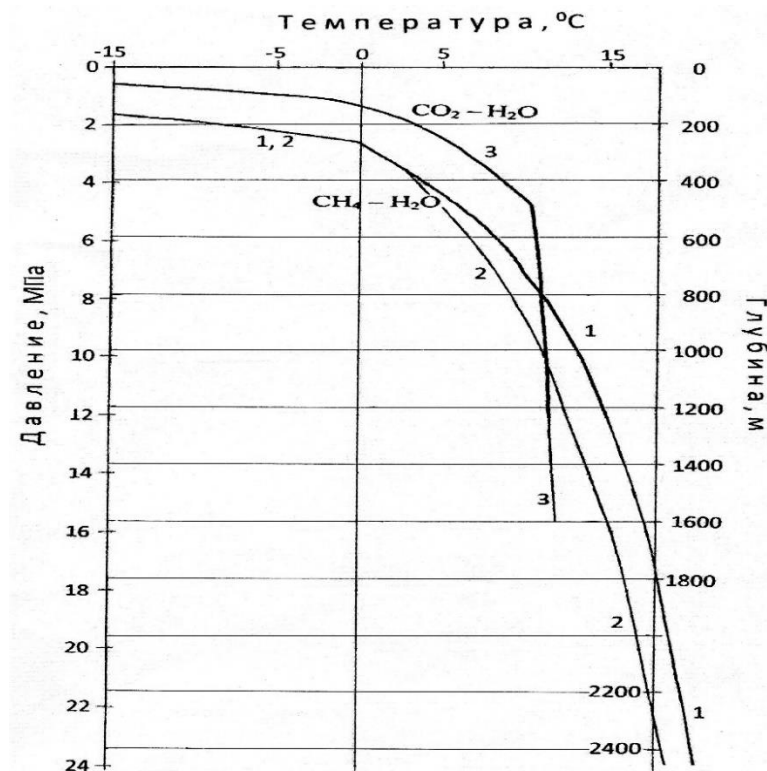


Рис. 1. Сводные фазовые диаграммы для систем CH₄-H₂O (графики 1, 2) и CO₂-H₂O (график 3) по данным из работ [Sloan, 1998; Истомин, Якушев, 1992; Scientific results..., 2005; Якуцени, 2013]. 1, 3 – вода пресная, 2 – вода морская (минерализация ~35 г/л). Эквивалентная глубина рассчитана по гидростатической модели распределения давления. Газовые гидраты формируются в областях, расположенных слева от диаграмм

При глубине менее 0.4 км диаграммы для метана практически совпадают. Увеличение минерализации приводит к сдвигу фазовой диаграммы в сторону более низких температур. Влияние минерализации на процесс гидратообразования хорошо иллюстрирует также и рис. 2 из работы [Scientific results..., 2005].

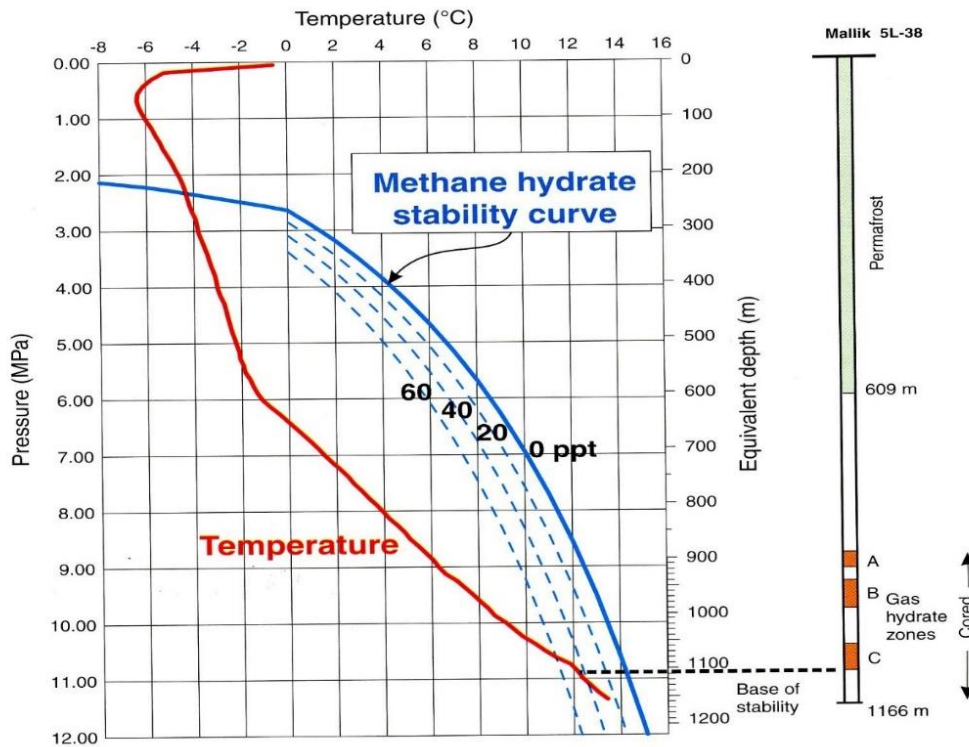


Рис. 2. Пример определения границ ЗСГ по скважине Mallik 5L-38 (Арктическое побережье Канады) [Scientific results..., 2005]. Красный график – термограмма по скважине; синие графики – фазовые диаграммы для системы «метан-вода» при разной минерализации подземных вод: 0, 20, 40, 60 ppt. Справа показана упрощенная геологическая колонка по той же скважине: А, В, С – интервалы, содержащие гидраты метана

Границы ЗСГ определяются по точкам (верхней и нижней) пересечения термограмм и фазовых диаграмм при их сопоставлении по температуре и глубине (давлению). Пример такого графического метода определения расположения границ ЗСГ показан на рис. 2. Верхняя точка пересечения графиков (и соответственно верхняя граница ЗСГ) располагается в пределах криолитозоны на глубине 240–250 м. Нижняя граница ЗСГ располагается в талых породах на глубине 1100 м. Она определяется по пересечению термограммы с фазовой диаграммой для воды с минерализацией 40 ppt, заполняющей околоскважинные породы. Судя по геологической колонке на глубине 1100 м завершается и гидратообразование.

Схемы зон стабильности газовых гидратов (в основном метана и углекислого газа) для отдельных осадочных бассейнов и Сибири в целом строятся достаточно давно [Истомин, Якушев, 1992]. Их детальность определяется количеством геотермических данных. Сравнительно недавно авторы оценили параметры ЗСГ углекислого газа и метана в осадочном чехле Западно-Сибирского бассейна [Дучков и др., 2009]. В данной статье дается оценка расположения границ ЗСГ метана в осадочном чехле Вилюйской синеклизы. Кратко рассмотрим полученные при этом результаты.

ЗОНА СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ МЕТАНА В ПОРОДАХ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

Подробно этот материал, как отмечено выше, изложен в работе [Дучков и др., 2009]. Здесь мы отметим только основные черты распределений криолитозоны и ЗСГ метана.

Многолетнемерзлые породы присутствуют в осадочном чехле этого региона вплоть до широтного течения р. Оби (до 60-61° с.ш.). На крайнем севере верхняя граница криолитозоны совпадает с поверхностью. К югу она постепенно перекрывается слоем талых пород и опускается на юге до 0.12–0.14 км. Мощность мерзлоты максимальна (0.5–0.6 км) в арктической части плиты. Южнее нижняя граница мерзлоты постепенно поднимается до 0.3 км на широтах 64–62° и затем выклинивается. В этих условиях верхняя граница зоны стабильности гидратов метана располагается в криолитозоне на глубинах 0.2–0.25 км. Нижняя граница ЗСГ повсеместно опускается ниже подошвы мерзлоты. Наибольшую мощность ЗСГ имеет в северо-восточной части плиты, где ее нижняя граница располагается на глубинах 0.7–0.9 км. К юго-западу и югу эта граница поднимается до 0.3 км и затем постепенно смыкается с верхней. В зону стабильности гидратов метана Западно-Сибирской плиты входят в основном отложения палеогена и частично верхнего мела. На севере региона в непосредственной близости от подошвы ЗСГ находятся газовые залежи сеноманского и туронского горизонтов. В целом зона стабильности гидратов метана занимает огромный объем как мерзлых, так и талых осадочных пород.

ЗОНА СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОГИДРАТОВ В ПОРОДАХ ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Вилюйский мезозойский бассейн, расположенный в восточной части Сибирской платформы, относится к числу важнейших регионов России по концентрации углеводородных природных ресурсов [Погодаев, 2016; Ситников и др., 2017]. Верхняя часть осадочного чехла Вилюйской синеклизы мощностью 1–2 км сложена терригенными породами верхнеюрского и мелового возраста с преобладанием песчано-алевритистых фаций. В регионе открыт целый ряд многоэтажных газовых и газоконденсатных месторождений. Самая верхняя газовая залежь (глубина 1 км) зафиксирована на Средне-Вилюйской площади. В пределах синеклизы подмерзлотные горные породы мелового и верхнеюрского возраста содержат в основном пресную воду. С глубиной (отложения нижней юры, триаса, перми) минерализация подземных вод резко увеличивается до 35–100 г/л. Вся гидрогеологическая система синеклизы насыщена водорастворенным газом, в основном метаном. Для Вилюйской синеклизы в целом характерен низкоактивный режим пластовых вод, однако по изменениям газового состава фиксируются признаки межрезервуарных перетоков пластовых жидкостей (в основном по трещинам и зонам разломов). Это способствует формированию новых месторождений газа (и газогидратов) в благоприятных условиях, в том числе и в верхнеюрско-меловых толщах, «залегающих непосредственно под криолитозоной ... над ранее выявленными традиционными залежами газов» [Ситников и др., 2017]. Именно в этих толщах должны существовать необходимые условия и для формирования газогидратов метана, и их скоплений. Для проверки этого предположения необходимо в первую очередь выяснить расположение ЗСГ метана в осадочном чехле Вилюйской синеклизы.

Температурный режим верхней части осадочного чехла Вилюйской синеклизы в большой степени определяется криолитозоной, которая изучена достаточно детально в результате многолетних геотермических исследований, проведенных в этом регионе сотрудниками ИМЗ СО РАН [Семенов, Железняк, 2013]. Ее нижняя граница определяется по расположению нулевой изотермы. Результаты высокоточных температурных измерений, стандартного термокаротажа, а также косвенные данные позволили оценить глубину расположения нулевой изотермы, а соответственно и мощность криолитозоны, на 46 участках (Таблица). Средние значения мощности мерзлого слоя на изученных участках изменяются от 0.06 до 0.82 км, отмечается ее возрастание в северном и западном направлениях, выявлены значительные (до 0.1 км) изменения мощности мерзлоты в пределах отдельных участков.

Таблица

Значения мощности криолитозоны, температуры на глубинах 1 и 2 км, верхних (H_1) и нижних ($H_{2п}$ и $H_{2м}$) границ зоны стабильности гидратов (ЗСГ) метана для разведочных площадей Вилюйской синеклизы

N	Площадь	Расположение нижней границы криолитозоны (нулевой изотермы), км	T, °C на глубине:		Границы ЗСГ метана, км		
			1 км	2 км	H_1	$H_{2п}$	$H_{2м}$
1	23 км Вилюйс. тракта	0.36	11.4	29.6	0.24	1.2	1.02
2	40 км Вилюйс. тракта	0.36	11.4	29.6	0.24	1.2	1.02
3	Андреевская	0.48	11.1	32.4	0.21	1.16	1.01
4	Андылахская	0.72	6.8	31.2	0.18	1.4	1.25
5	Бадаранская	0.53	18	39	0.18	0.84	0.76
6	Балагачинская	0.7	9.5	41.2	0.16	1.14	1.05
7	Баппагайская	0.46	10.3	29.3	0.23	1.26	1.06
8	Барыканская	0.47	11.7	33.7	0.2	1.1	0.96
9	Бахынайская	0.64	7.7	29.1	0.19	1.42	1.25
10	Бергеинская	0.37	13.3	34.4	0.24	1.05	0.82
11	Борулахская	0.6	–	–	–	–	–
12	Верхне-Линденская	0.7	7	34	0.18	1.35	1.22
13	Верхне-Синская	0.5	8.3	24.3	0.23	1.51	1.27
14	Вилюйская	0.57	10.2	34.9	0.2	1.18	1.04
15	Кенкеменская	0.39	11.4	29.6	0.24	1.17	0.97
16	Китчанская	0	20	–	0	0	0
17	Кэдэпчинская	0.29	13.3	32.1	0.25	0.99	0.75
18	Кэдэргинская	0.17	8.8	19.4	0.31	1.9	1.58
19	Линденская	0.7	9.3	40.4	0.16	1.16	1.06
20	Мастахская	0.57	17.1	53.1	0.16	0.85	0.79
21	Меикская	0.69	4.5	19	0.2	1.84	1.68
22	Намская	0.48	11.3	33.7	0.21	1.14	0.99
23	Нюрбинская	0.48	9.8	28.6	0.23	1.32	1.12
24	Неджелинская	0.46	17	42.8	0.2	0.84	0.74
25	Нижне-Вилюйская	0.56	22.5	48	0.16	0.77	0.72
26	Нижне-Тюкянская	0.47	9.2	26.2	0.23	1.4	1.18
27	Олойская	0.38	15.2	39.7	0.23	0.86	0.72
28	пос. Магарас	0.4	14.4	30	0.23	0.92	0.78
29	пос. Орто-Сурт	0.48	11.4	33.3	0.21	1.09	0.94
30	Сабо-Хаинская	0.06	29	61.3	0	0	0
31	Сангарская	0.07	25.6	53.1	0	0	0
32	Северо-Линденская	0.7	6.2	26.5	0.18	1.45	1.31

33	Северо-Тюнгская	0.7	5.8	25.2	0.18	1.56	1.4
34	Синская	0.44	8.3	24.3	0.24	1.6	1.34
35	Средне-Виллюйская	0.55	15.3	49.1	0.18	0.9	0.83
36	Средне-Мархинская	0.82	2	11.5	0.2	2.84	2.6
37	Средне-Тюнгская	0.6	11.6	43.7	0.18	1.09	0.99
38	Сунтарская	0.28	8	19.4	0.26	1.96	1.68
39	Толонская	0.56	15	45	0.18	0.93	0.85
40	Уорангская	0.62	10	35	0.18	1.15	1.03
41	Уордахская	0.4	11.4	33	0.24	1.16	0.97
42	Усть-Виллюйская	0.15	28.3	62.1	0	0	0
43	Усть-Мархинская	0.49	9.5	27.4	0.22	1.34	1.14
44	Усть-Меикская	0.7	3.6	15.8	0.21	2.32	2.1
45	Хайлахская	0.6	11.7	33.7	0.18	1.08	0.98
46	Эксеняхская	0.29	15	36	0.26	0.84	0.62

Примечание к таблице. Геотермические данные (глубина нулевой изотермы, значения температуры на глубине 1 и 2 км) подготовлены сотрудниками ИМЗ СО РАН; H_1 – глубина залегания верхней границы ЗСГ при любой минерализации воды в породе, $H_{2п}$, $H_{2м}$ – глубина расположения нижней границы ЗСГ при насыщении пород пресной или минерализованной (35 г/л) водой. Борулахская площадь (№ 11) – нет данных для оценки ЗСГ; Китчанская, Сабо-Хаинская, Сангарская площади (№№ 16, 30, 31) – нет ЗСГ из-за отсутствия или незначительности криолитозоны.

На данном этапе оценки параметров ЗСГ можно принять, что для всех участков характерен примерно одинаковый вид термограмм. От поверхности до нижней границы мерзлоты температура горных пород повсеместно отрицательная. Ее минимальные значения, порядка $-(3-5)^\circ\text{C}$, фиксируются примерно на глубине 0.1 км. Глубже температура увеличивается до 0°C на нижней границе криолитозоны. В подмерзлотной толще пород температура нарастает с глубиной со скоростью, определяемой геотермическим градиентом, изменяющимся на отдельных участках от 10 до 36 мК/м. В первом приближении изменения температуры с глубиной на отдельных участках можно охарактеризовать средними значениями T на глубинах 1 (T_1) и 2 (T_2) км. Большая часть участков характеризуется средними значениями T_1 и T_2 в пределах $(15-20)^\circ\text{C}$ и $(25-45)^\circ\text{C}$, соответственно (см. табл.). Для сравнения можно отметить, что в северных районах Западно-Сибирской плиты температуры нарастают в подмерзлотном слое значительно быстрее: $T_1 = (20-30)^\circ\text{C}$ и $T_2 = (50-70)^\circ\text{C}$. Именно эти различия в темпе увеличения T приводят к формированию более мощной ЗСГ в осадочном чехле Виллюйской синеклизы.

Обзор геотермических данных позволяет заключить, что распределение температуры с глубиной в пределах каждого изученного участка Виллюйской синеклизы можно охарактеризовать средними термограммами, построенными по четырем точкам: 1) $T = -5^\circ\text{C}$ на глубине 0.1 км для всех площадей; 2) $T = 0^\circ\text{C}$ на нижней границе мерзлоты (см. табл.); 3-4) средние для участка значения T_1 и T_2 (см. табл.). Для определения границ ЗСГ такие термограммы по каждому из изученных площадей Виллюйской синеклизы сравнивались с фазовыми диаграммами $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ (рис. 1, графики 1 и 2).

В результате для каждого участка определены глубины расположения верхней и двух нижних (для пород, содержащих пресную и минерализованную воду) границ ЗСГ метана. Эти данные указаны в

таблице. Верхняя граница ЗСГ (H_1) располагается в криолитозоне на глубинах 0.16–0.31 км (в среднем ~ 0.2 км), нижние границы – в подмерзлотном слое. При заполнении пород пресной водой глубина расположения нижней границы ($H_{2п}$) составляет 0.77–2.84 км в зависимости от мощности криолитозоны и величины внутриземного теплового потока, при среднем $H_{2п} = 1.2$ км. В случае минерализованной воды нижняя граница ($H_{2м}$) располагается примерно на 150 м выше, на глубинах 0.62–2.6 км, при среднем $H_{2м} = 1.1$ км. В целом, границы $H_{2п}$ и $H_{2м}$ в пределах Вилюйской синеклизы имеют одинаковые очертания. Для их характеристики на рис. 3 приведено распределение $H_{2п}$.

Наиболее высоко (0.8–0.9 км) нижняя граница ЗСГ расположена в центральной части Вилюйской синеклизы, в пределах Хапчагайского мегавала. Именно здесь ЗСГ имеет минимальную мощность порядка 0.6–0.7 км. На большей части территории за пределами Хапчагайского мегавала $H_{2п}$ опускается до 1.2–1.4 км. К сожалению, отсутствие геотермических данных восточнее р. Лены не позволяет замкнуть или расширить на восток наметившиеся контуры нижней границы ЗСГ. Максимальные значения мощности ЗСГ прогнозируются в западной части синеклизы, где $H_{2п}$ располагается на глубинах более 1.6–2 км.



Рис. 3. Схемы расположения в осадочном чехле Вилюйской синеклизы нижних границ ЗСГ ($H_{2п}$, черные изолинии, оцифровка в км) и криолитозоны (желтые изолинии, оцифровка в метрах; схема построена сотрудниками ИМЗ СО РАН). Точками с номерами отмечены изученные разведочные площади; они также перечислены в таблице. Черный контур – граница синеклизы. Цифрами I, II, III, IV обозначены угловые точки рамки рисунка. Координаты угловых точек: I – 66,8° с.ш., 112,4° в.д., II – 67,3° с.ш., 131,4° в.д., III – 60,8° с.ш., 115° в.д., IV – 61,2° с.ш., 131° в.д.

В целом распределение нижней границы ЗСГ метана в осадочном чехле Вилюйской синеклизы хорошо согласуется с латеральным изменением теплового потока [Семенов, Железняк, 2014] и заметно отличается от расположения подошвы криолитозоны (рис. 3). На наш взгляд, это связано с тем, что параметры ЗСГ зависят не только от мощности криолитозоны, но и от величины геотермического градиента (теплового потока) в подмерзлотном слое, причем последний фактор в данном случае имеет основное значение. В качестве примера можно указать на данные по Сунтарской (№ 38) и Эксеняхской (№ 46) площадям (см. табл.). Средние мощности криолитозоны на этих площадях одинаковы и составляют в среднем 0.28–0.29 км. Однако температуры в подмерзлотном слое на этих площадях существенно различаются, что приводит к разным оценкам расположения нижней границы ЗСГ метана. На Эксеняхской площади $T_2 = 36^\circ \text{C}$ и $H_{2n} = 0.84$ км, а на Сунтарской площади при $T_2 = 19.4^\circ \text{C}$, нижняя граница ЗСГ, по нашей оценке, опускается почти на 2 км ($H_{2n} = 1.96$ км).

Необходимо отметить, что на рис. 3 показан первый вариант схемы глубины залегания нижней границы ЗСГ метана в породах Вилюйской синеклизы, насыщенных пресной водой. Чтобы проверить выполненные расчеты, необходимо дальнейшее уточнение средних оценок мощности криолитозоны, распределения подмерзлотных температур, минерализации подземных вод. Другой задачей является более детальное изучение параметров ЗСГ метана в пределах отдельных, хорошо разбуренных площадей. Выполненные в этом случае уже по реальным термограммам оценки глубин расположения границ ЗСГ позволят уточнить их расположение относительно верхних этажей газовых месторождений. Пока еще раз отметим, что самая близкая к земной поверхности (~1 км) газовая залежь зафиксирована на Средне-Вилюйском месторождении, где $H_{2n} = 0.9$ км.

Оценка параметров ЗСГ является первоочередной и необходимой, но не самой важной процедурой при прогнозировании и поисках газогидратов. После ее завершения мы получаем представление о расположении слоя пород, в котором имеются необходимые для формирования гидратов метана температура, давление и вода. Для образования в этом слое скоплений газогидратов необходимо поступление в него в течение длительного времени значительного количества природного газа. Прогнозирование наличия потоков газа или газонасыщенной воды и путей их миграции, а соответственно и мест возможного расположения залежей газогидратов, намного сложнее. Возможно с этим связаны пока незначительные результаты поисков месторождений гидратов метана, которые идут в северных районах континентов (в том числе и в Сибири) уже более 50 лет. Рассмотрим некоторые итоги этих работ.

КРАТКИЙ ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ПОИСКОВ ГАЗОГИДРАТОВ В ОБЛАСТЯХ РАЗВИТИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

Сибирский регион

Длительное время весьма высоко оцениваются перспективы обнаружения скоплений гидратов метана в ЗСГ Западной Сибири. Так, уже более 50 лет считается, что гидраты метана присутствуют в верхней части (входящей в ЗСГ) Мессояхского газового месторождения, залегающего в породах сеноманского яруса [Истомин, Якушев, 1992; Makogon et al., 2007]. В то же время высказываются и

обоснованные сомнения на этот счет [Гинсбург и др., 2000; Якуцени, 2013]. Считается, что более благоприятные условия для формирования скоплений гидратов метана существуют в коллекторах туронского яруса, залегающих выше сеноманских отложений, например, в пределах Восточно-Мессояхской площади [Агалаков и др., 2001]. Тем не менее, приходится констатировать, что на севере Западной Сибири природные газовые гидраты до сих пор в керне не поднимались (это отмечено и в работе [Якуцени, 2013]). Все рассуждения о возможном присутствии газогидратов в разрезах основываются только на косвенных признаках, по которым нельзя с уверенностью судить даже о существовании, тем более геологии и размерах гидратных месторождений, не говоря уже об оценке содержащихся в них запасов газа и отработке технологии его добычи. Применяемые при бурении на нефть и газ технологии (бурение без отбора керна, аномальные изменения P–T условий) не могут привести к обнаружению скоплений газогидратов, даже если бы они и были в разрезах. К сожалению, несмотря на огромный масштаб бурения, в Западной Сибири практически не проводились работы по целенаправленным поискам скоплений метангидратов в перспективных частях разрезов (в пределах ЗСГ) и, что очень важно, с применением специального оборудования для разбуривания и отбора гидратосодержащего керна.

Наиболее часто обсуждаются два механизма формирования скоплений газогидратов в районах распространения многолетнемерзлых пород [Истомин, Якушев, 1992].

Во-первых, формирование гидратов возможно при вхождении в плейстоцене ранее образовавшихся газовых месторождений в зону ЗСГ метана. Предполагается, что именно это и произошло с залежью Мессояхского месторождения [Макогон et al., 2007]. По этой версии в настоящее время в ЗСГ находится только его верхняя часть. Остальные газовые месторождения в сеноманских отложениях, с которыми связан основной газовый потенциал Западной Сибири, расположены, в целом, существенно глубже ЗСГ. Газоносность расположенных выше туронских отложений пока недостаточно разведана [Агалаков и др., 2001]. Весьма вероятно, что такой тип месторождения гидратов метана выявлен китайскими специалистами в Тибете [Song et al., 2014]. Краткие сведения об этом открытии представлены ниже.

Во-вторых, гидратная залежь может образоваться при поступлении природного газа из более глубоких горизонтов в зону стабильности. Этот механизм может быть реализован только в процессе формирования ЗСГ в пределах водонасыщенного коллектора в неконсолидированных породах при одновременном поступлении в этот коллектор достаточного количества метана. Судя по имеющимся данным, на севере Западной Сибири имеются все перечисленные условия, необходимые для реализации второго механизма, кроме одного и возможно основного: здесь нет подходящих для накопления гидратов коллекторов, так как на севере Западной Сибири кайнозойские слабосцементированные отложения практически не развиты: в Ямало-Тазовском и Енисейском районах мощность отложений неогена не превышает 0.2 км, а палеогена – 0.3–0.4 км [Волкова и др., 2002]. Возможно более благоприятные геологические условия для формирования скоплений гидратов метана такого типа могут существовать в восточной части арктической зоны Сибири. Ниже кратко рассмотрено газогидратное месторождение

второго типа, выявленное в дельте реки Маккензи (арктическое побережье Канады) [Scientific results..., 2005].

На наш взгляд, успех в поисках газогидратных скоплений на севере Западной Сибири может обеспечить только постановка специальных буровых работ на предварительно выбранной (с учетом ЗСГ, литологии, сведений о газоносности разреза) площади с применением технологий, способствующих сохранению газогидратов в керне в процессе бурения и впоследствии. Именно такой подход был использован при открытии указанных выше месторождений гидратов метана в Канаде и Китае.

Месторождение гидратов в Тибете

Выше отмечалось, что формирование гидратов возможно при вхождении уже существующих газовых месторождений в ЗСГ, образовавшуюся при похолодании в плейстоцене. Весьма вероятно, что именно такой тип месторождения гидратов метана выявлен китайскими специалистами в мезозойских впадинах на Цинхай-Тибетском нагорье (координаты 38°05,5' с.ш., 99°10' в.д., альтитуда 4–4,1 км) [Song et al., 2014]. Впадины сложены породами юрского (J₂) возраста: мелкозернистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами, залежами каменного угля. В разрезах обнаружены нефте- и газопроявления. Мощность мерзлоты достигает 0.14 км, мощность ЗСГ – 0.4 км. Границы мерзлоты и ЗСГ значительно изменяются в разрезах в зависимости от поверхностной обстановки. Поиски гидратных скоплений велись на участке с 1999 г. Специальное бурение здесь было организовано в 2008–2009 гг. Пробурено четыре скважины глубиной 0.18–0.76 км с детальным отбором керна. Основным результатом исследований явился подъем гидратосодержащего керна с глубины 0.13–0.4 км. Гидраты встречены в виде льдоподобных слоев мощностью 0.2–4.8 м или рассеянных включений в трещинах кернов. Гидратные проявления мало связаны с литологией. В гидратном газе преобладает метан (54–76 %), а также этан, пропан и СО₂. Это открытие является первой находкой образцов гидратов метана в охлажденной зоне, расположенной в средних широтах.

Месторождение в дельте р. Маккензи (северная Канада)

Другой тип месторождения гидратов метана открыт в осадках над газовым месторождением Маллик в дельте реки Маккензи (арктическое побережье Канады, координаты 69,5° с.ш., 134-135° в.д.) [Scientific results..., 2005]. В этом районе мощность слабосцементированных кайнозойских отложений достигает 2 км, мерзлоты – 0.64 км, ЗСГ – 1.1 км. В 1998–2002 гг. здесь было пробурено несколько исследовательских скважин до глубины 1.15 км. Работы выполнялись международной группой, финансируемой научными организациями Канады, США, Японии, Германии. Геологические и геотермические данные по одной из скважин показаны на рис. 2. При бурении этой и других скважин в нижней части ЗСГ (глубина 0.89–1.1 км) в грубозернистых песках олигоцена обнаружены гидраты метана. При детальном отборе керна на этих глубинах было поднято порядка 110 м гидратосодержащих осадков. Пористость песков изменяется от 25 % до 35 %, а мощность гидратных слоев – от 0.1 до 1.5 м. Насыщенность гидратом порового пространства составляет 50–80 %. Метан, извлеченный из гидратосодержащего керна, относится к термогенному типу. Установлено, что при формировании гидратов газ поступал в песчаный коллектор с глубины 4–5 км по разломной зоне. Газогидраты

распространены в дельте р. Маккензи на площади более 3600 км². Ряд аналогичных месторождений гидратов выявлены и в США на северном побережье Аляски.

ВЫВОДЫ

В статье кратко описана современная ситуация, связанная с поисками месторождений гидратов метана в континентальной части Сибирского региона. Идея поисков возникла вскоре после того, как в 1960-х годах коллектив исследователей во главе с А.А. Трофимуком опубликовал идею (а затем и зарегистрировал открытие) о возможности формирования скоплений газогидратов в земной коре [Васильев и др., 1970]. Задача оказалась весьма сложной. Сейчас приходится констатировать, что за прошедшие более 50 лет не удалось достоверно (с извлечением гидратосодержащего керна) выявить ни одного месторождения метангидратов, даже в породах наиболее хорошо изученного Западно-Сибирского осадочного бассейна, где проведены масштабные объемы бурения на нефть и газ, выявлены косвенные признаки наличия гидратов в разрезах многих площадей, послуживших основанием для многочисленных прогнозов.

На примере успешного открытия двух месторождений гидратов метана в Канаде и Китае показано, что привести к успешному решению задачи по поиску газогидратов может только организация и выполнение целевого проекта на проведение специализированных, технически обеспеченных буровых работ (до глубин 1–2 км) на уже выделенных перспективных участках в северных районах Западной Сибири или в пределах Вилюйской синеклизы.

В данной работе впервые определены параметры зоны стабильности гидратов метана в осадках Вилюйской синеклизы. Показано, что здесь существуют весьма благоприятные условия для формирования скоплений метангидратов: запесоченный разрез, повышенное содержание растворенного метана в воде по всему разрезу, признаки перемещений потоков газа и воды, а также значительные мощности ЗСГ (больше, чем в Западной Сибири), нижние границы которой практически достигают уже выявленных газовых залежей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В.П. Семенова за предоставление геолого-геофизических материалов по Вилюйской синеклизе. Исследования поддержаны Интеграционным проектом № 6 «Палеорекострукция теплового поля и криолитозоны Вилюйской синеклизы в позднем плейстоцене-голоцене» Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг.

ЛИТЕРАТУРА

Агалаков С.Е., Курчиков А.Р., Бабурин А.Н. Геолого-геофизические предпосылки существования газогидратов в туронских отложениях Восточно-Мессояхского месторождения // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 11–12. – С. 1785–1791.

- Васильев В.Г., Макогон Ю.Ф., Требин Ф.А., Трофимук А.А., Черский Н.В.** Свойство природных газов находиться в земной коре в твердом состоянии // Открытия, изобретения, товарные знаки. – М.: Наука. 1970. – № 10. – С. 32–36.
- Волкова В.С., Архипов С.А., Бабушкин А.Е., Кулькова И.А., Гуськов С.А., Кузьмина О.Б., Левчук Л.К., Михайлова И.В., Сухорукова С.С.** Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири: Кайнозой Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во «Гео». – 2002. – 245 с.
- Гинсбург Г.Д., Новожилов А.А., Дучков А.Д., Прасолов Э.М., Заварзин И.В., Коллетт Т.С.** Присутствуют ли природные газовые гидраты в сеноманской залежи Мессояхского газового месторождения? // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 8. – С. 1165–1177.
- Горючий лед:** как развиваются технологии добычи метана из газовых гидратов в России. ТАСС. 18.01.2018 (электронный ресурс). <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/news/press/press-tass-goryuchiy-led-kak-razvivayutsya-tekhnologii-dobychi-18012018>.
- Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Пермьяков М.Е.** Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, № 4. – С. 62–68.
- Истомин В. А., Якушев В.С.** Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 235 с.
- Погодаев А.В.** Особенности геологического строения, закономерности формирования и размещения газоконденсатных месторождений Вилюйской синеклизы, обоснование новых направлений нефтегазопоисковых работ: Диссертация на соискание ученой степени к.г.-м.н. – Якутск: ИПНГ СО РАН, 2016. – 156 с.
- Семенов В.П., Железняк М.Н.** Геотермические условия Вилюйской синеклизы // Криосфера Земли. – 2013. – Т. XVII, № 4. – С. 3–10.
- Ситников В.С., Алексеев Н.Н., Павлова К.А., Погодаев А.В., Слепцова М.И.** Новейший прогноз и актуализация освоения нефтегазовых объектов Вилюйской синеклизы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12, № 1. – 20 с.
- Якуцени В.П.** Газогидраты – нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. – Т. 8, № 4. – 24 с.
- Makogon Y.F., Holditch S.A., Makogon T.Y.** Natural gas hydrates – a potential energy source for the 21st century // J. Petrol. Sci. Engin. – 2007. – Vol. 56, No. 1. – P. 14–31.
- Mazurenko L.L., Soloviev V.A.** Worldwide distribution of deep-water fluid venting and potential occurrences of gas hydrate accumulations // Geo Marine Lett. – 2003. – Vol. 23, No. 304. – P. 162–176.
- Scientific results** from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northern Territories, Canada / Eds. Dallimore S.R. and Collett T.S. Ottawa, Geological Survey of Canada. – 2005. – Bulletin 585 – 140 p.
- Sloan E.D.** Physical/chemical properties of gas hydrates and application to world margin stability and climatic change // Gas hydrates: relevance to world margin stability and climatic change / Eds. Henriot J-P. and Mienert J. Geological society, London, 1998. – Special publication No. 137. – P. 31–50.
- Song Y., Yang L., Zhao J., Liu W., Yang M., Li Y., Liu Y., Li Q.** The status of natural gas hydrate research in China: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – No. 31. – P. 778–791.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДУЧКОВ Альберт Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геотермия, газовые гидраты.

СОКОЛОВА Людмила Степановна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геотермия, тепловые свойства пород.

ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, директор Института мерзлотоведения СО РАН. Область научных интересов: мерзлотоведение, геотермия.

АЮНОВ Дмитрий Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геотермия, тепловые свойства пород.