

ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В КРИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

УДК 550.361

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-6(19-26)

ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ МЕТАНА И ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
В ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫА.Д. Дучков¹, М.Н. Железняк², Л.С. Соколова¹, В.П. Семенов²¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия; duchkovad@ipgg.sbras.ru²Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

Представлены результаты определения границ зон стабильности гидратов метана и диоксида углерода в 46 пунктах Вилюйской синеклизы. Описана методика расчетов границ зон стабильности гидратов по геотермическим данным и фазовым диаграммам, показывающим условия формирования гидратов в системах $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$, приведены результаты расчетов. По этим данным построена схема расположения нижней границы зоны стабильности гидратов метана в пределах всей синеклизы и показано ее расположение вдоль широтного профиля через Хапчгайский мегавал. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в осадочном чехле Вилюйской синеклизы существуют благоприятные условия для формирования газовых гидратов: песчаный разрез, повышенное содержание растворенного метана в подземной воде по всему разрезу, а также значительные мощности зон стабильности гидратов.

Вилюйская синеклиза, криолитозона, гидраты метана и диоксида углерода, зоны стабильности газогидратов

METHANE AND CARBON DIOXIDE HYDRATE STABILITY ZONES
IN THE SEDIMENTARY COVER OF THE VILYUI SYNECLISEA.D. Duchkov¹, M.N. Zheleznyak², L.S. Sokolova¹, V.P. Semenov²¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
3, Akad. Koptuyug prosp., Novosibirsk, 630090, Russia; duchkovad@ipgg.sbras.ru
²Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia

Authors present the results of the gas hydrate stability zone boundaries for methane and carbon dioxide hydrates at 46 sites in the Vilyui syncline sedimentary basin. Geothermal data and phase diagrams representing formation conditions of hydrate $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ systems have been used to account the gas hydrates stability zone boundaries. This paper describes the methods and presents the calculated results. Authors used these data to construct the layout scheme of the methane hydrates stability zone lower boundary within the whole Vilyui syncline and its arrangement along the latitudinal profile through Khapchagaysky megaswell. The results allow us to draw conclusion that in the sedimentary cover of the Vilyui syncline favorable conditions for the gas hydrates formation exist. Among them are sandy sections, high concentrations of dissolved methane in the underground water throughout the section, as well as the considerable thicknesses of gas hydrates stability zones.

Vilyui syncline, cryolithozone, methane and carbon dioxide hydrates, gas hydrates stability zones

ВВЕДЕНИЕ

Газовые гидраты (метана, диоксида углерода и др.) широко распространены в природе. Необходимым условием образования и сохранности природных газогидратов в горных породах является наличие необходимых давления (P) и температуры (T), а также достаточного количества воды и свободного (или растворенного в воде) газа – гидратообразователя. Такие условия реализуются в охлажденных осадочных породах криолитозоны и в донных осадках глубоких акваторий [Истомин, Якушев, 1992]. Интерес к гидратам метана CH_4 связан в основном с их потенциальным энергетическим ресурсом [Makogon et al., 2007]. Гидраты

диоксида углерода CO_2 привлекают внимание в связи с возможностью захоронения избытков этого парникового газа в гидратной форме и использования CO_2 при разработке скоплений гидратов метана [Дучков и др., 2009].

Длительное время высоко оценивались перспективы обнаружения месторождений гидратов метана в Сибирском регионе, в пределах которого широко развита криолитозона. Однако в настоящее время приходится констатировать, что даже в пределах хорошо изученной бурением северной части Западно-Сибирской плиты выявлены только косвенные признаки (геофизические аномалии,

притоки газа в скважину при уменьшении давления в стволе и др.) наличия гидратов в разрезах многих разведочных площадей, которые нигде в Сибири пока не подтверждены поднятием гидратосодержащего керна в процессе бурения скважин (сказанное справедливо и для Мессояхского газового месторождения) [Якуцени, 2013]. Именно косвенные признаки являются основанием многочисленных прогнозов, содержащих оптимистические оценки ресурсов метана в газогидратах на территории РФ [Горючий лед..., 2018]. 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) [Dallimore, Collett, 2005], а также в высокогорном Тибете [Song et al., 2014]. Более продуктивными оказались поиски газогидратов в донных отложениях морей и глубоких озер. Посредством бурения и отбора керна грунтовыми трубками уже выявлено более 200 скоплений гидратов метана в поддонных и более глубоких осадках, в том числе в Сибирском регионе (Охотское море, оз. Байкал) [Mazurenko, Soloviev, 2003].

Известно, что газовые гидраты могут образовываться и сохраняться только в определенных слоях горных пород, называемых зонами стабильности газогидратов (ЗСГ). Они располагаются на глубинах до 1–2 км, не имеют четких литологических границ и выделяют ту часть разреза, в которой существуют необходимые для формирования газовых гидратов условия (низкие температуры, высокие давления). Попадание изучаемой части геологического разреза в ЗСГ является основным косвенным признаком возможного наличия в нем газогидратов.

Современные зоны стабильности газогидратов в континентальных породах Северного полушария сформировались при похолодании климата в плейстоцене и возникновении криолитозоны. Образование и развитие ЗСГ на континентах в целом повторяют эволюцию мерзлого слоя, при изменении его контура изменяются и параметры ЗСГ. Зоны стабильности гидратов могут образовываться во всех охлажденных разрезах, однако при поисках газогидратов интерес представляют только водонасыщенные осадочные бассейны. Ресурсное значение ЗСГ весьма велико, так как только в их пределах могут формироваться и сохраняться скопления газа в гидратной форме (здесь не рассматриваются реликтовые газогидраты, которые, по оценкам [Якушев, 2009], могут существовать в мерзлоте вне ЗСГ). Соответственно, оценка параметров ЗСГ является первоочередной задачей при прогнозировании и разведке скопленных газогидратов.

Схемы зон стабильности газовых гидратов (в основном метана и углекислого газа) для отдельных осадочных бассейнов Сибири строятся достаточно давно [Макогон, 1974; Истомин, Якушев, 1992]. Для этого надо иметь геотермическую информацию и фазовые диаграммы, показывающие условия формирования гидратов в системах “газ–вода”. Детальность схем ЗСГ определяется количеством и качеством геотермических данных. Сравнительно недавно были оценены параметры ЗСГ диоксида углерода и метана в осадочном чехле Западно-Сибирского бассейна по большой базе геотермических данных (термограммы по 500 скважинам глубиной от 100 до 4000 м, расположенным на 380 участках) [Дучков и др., 2009]. В итоге показано, что в северной части плиты, где мощность мерзлоты составляет 500–600 м, нижние границы ЗСГ располагаются на глубинах 700–900 м, достигая верхов сеноманских отложений. В настоящей работе выполнена оценка расположения границ ЗСГ тех же газов в осадочном чехле Вилюйской синеклизы и рассмотрены полученные при этом результаты.

ГЕОЛОГИЯ ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Вилюйский мезозойский бассейн, расположенный в восточной части Сибирской платформы, относится к числу важных регионов России с высокой концентрацией углеводородных природных ресурсов [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 ряд многоэтажных газовых и газоконденсатных месторождений. 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 увеличением глубины (отложения нижней юры, триаса, перми) минерализация подземных вод резко возрастает до 35–100 г/л. Вся гидрогеологическая система синеклизы насыщена водородородным газом, главным образом метаном. По изменению газового состава фиксируются признаки межрезервуарных перетоков пластовых жидкостей (по трещинам и зонам разломов). Это способствует формированию новых месторождений газа в благоприятных условиях, в том числе 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 для формирования газогидратов. Для проверки этого предположения следует в первую очередь выяснить расположение ЗСГ метана и углекислого газа

в осадочном чехле Вилюйской синеклизы, используя имеющуюся геотермическую информацию и соответствующие фазовые диаграммы.

ТЕМПЕРАТУРА ОСАДОЧНЫХ ПОРОД ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Исследованием температурного режима верхней части осадочного чехла Вилюйской синеклизы занимаются сотрудники лаборатории геотермии криолитозоны ИМЗ СО РАН начиная с 1970-х гг. За этот период получен обширный материал о геотемпературном поле и параметрах многолетнемерзлой толщи региона [Балобаев, Десяткин, 1983; Балобаев, 1991; Семенов, Железняк, 2013, 2018; Железняк и др., 2018; Семенов, 2018]. Результаты проведенных геотермических исследований позволили оценить среднюю глубину расположения нулевой изотермы (H_0) и, соответственно, мощность криолитозоны по 46 разведочным площадям в пределах синеклизы [Семенов, 2018]. Расположение площадей и схема залегания нижней границы криолитозоны (нулевой изотермы) показаны на рис. 1. Средние значения мощности многолетнемерзлой толщи изменяются на изученных участках от 0.06 до 0.82 км (см. таблицу). Выявлено ее возрастание в северном и западном направлениях и значительные (до 0.2 км) изменения в пределах отдельных площадей (локальные структуры).

Установлена значительная неоднородность температуры горных пород на одинаковых глубинах в пределах различных площадей синеклизы. При этом для большинства площадей, в пределах которых мощность криолитозоны превышает 0.2 км, отмечен очень близкий вид термограмм (распределений температуры по глубине). Минимальные значения температуры ($-3...-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) фиксируются на глубине примерно 0.1 км. Глубже температура постепенно увеличивается до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на нижней границе криолитозоны. Ниже подошвы криолитозоны температура горных пород увеличивается с глубиной со скоростью, определяемой геотермическим градиентом (Γ), изменяющимся в среднем на отдельных участках от 1.0 до $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. Изменения температуры талых пород можно охарактеризовать также средними для каждого участка значениями температуры на глубинах 1 км (T_1), 1.5 км ($T_{1.5}$) и 2 км (T_2). Большая часть участков Вилюйской синеклизы характеризуется средними значениями $T_1 = 15-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_2 = 25-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отметим, что в северных районах Западно-Сибирской плиты температуры нарастают в подмерзлотном слое значительно быстрее: $T_1 = 20-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_2 = 50-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Дучков и др., 2009]. Именно эти различия в температурных режимах приводят к формированию более мощной ЗСГ в осадочном чехле Вилюйской синеклизы. Полученная геотермическая информация (средние зна-

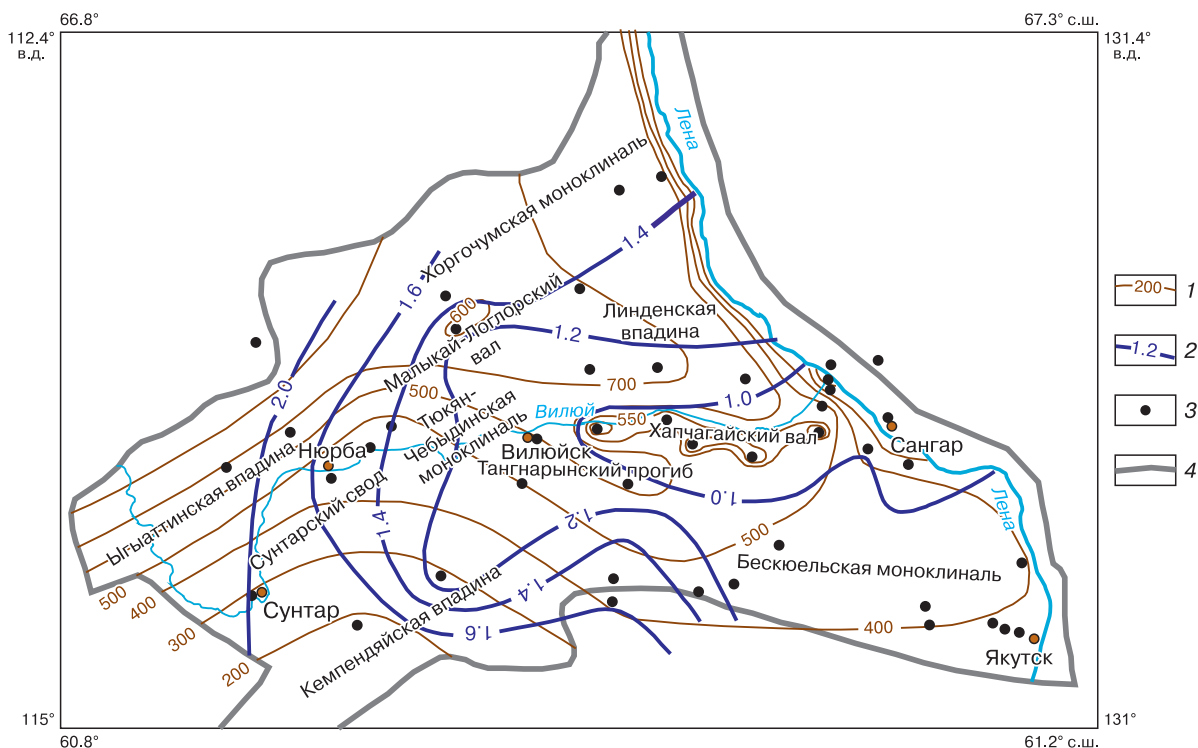


Рис. 1. Схемы расположения в осадочном чехле Вилюйской синеклизы нижних границ:

1 – криолитозоны (оцифровка изолиний в метрах) [Семенов, 2018]; 2 – зоны стабильности гидратов метана (граница H_{2m} , оцифровка изолиний в километрах); 3 – изученные разведочные площади (см. таблицу); 4 – граница синеклизы.

Оценки глубины залегания границ зон стабильности гидратов метана и диоксида углерода и геотермические данные по 46 разведочным площадям Виллойской синеклизы

№ п/п	Площадь	H_0 , км	Γ , °C/100 м	T_1 , °C	$T_{1.5}$, °C	T_2 , °C	Границы ЗСГ диоксида углерода, км		Границы ЗСГ метана, км		
							H_1	H_2	H_1	$H_{2п}$	$H_{2м}$
1	23-й км Виллойского тракта	0.36	–	11.4	20.5	29.6	0.10	1.0	0.24	1.20	1.02
2	40-й км Виллойского тракта	0.36	–	11.4	20.5	29.6	0.10	1.0	0.24	1.20	1.02
3	Андреевская	0.48	2.13	11.1	21.8	32.4	0.08	1.01	0.21	1.16	1.01
4	Андылахская	0.72	2.44	6.8	19.0	31.2	0.08	1.20	0.18	1.40	1.25
5	Бадаранская	0.53	2.01	18.0	29.5	39.0	0.09	0.82	0.18	0.84	0.76
6	Балагачинская	0.70	3.17	9.5	25.8	41.2	0.05	1.05	0.16	1.14	1.05
7	Бапагайская	0.46	1.90	10.3	19.8	29.3	0.08	1.06	0.23	1.26	1.06
8	Быраканская	0.47	2.20	11.7	22.7	33.7	0.07	0.99	0.20	1.10	0.96
9	Бахынайская	0.64	2.14	7.7	22.0	29.1	0.07	1.19	0.19	1.42	1.25
10	Берегинская	0.37	2.11	18.6	26.0	39.7	0.08	0.74	0.24	0.70	0.60
11	Борулахская	0.60	–	13.3	24.0	34.4	0.10	0.96	0.24	1.0	0.91
12	Верхне-Линденская	0.70	2.76	7.0	20.3	34.0	0.06	1.18	0.18	1.35	1.22
13	Верхне-Синская	0.50	1.60	8.3	14.4	24.3	0.08	1.19	0.23	1.51	1.27
14	Виллойская	0.57	2.48	10.2	22.5	34.9	0.07	1.04	0.20	1.18	1.04
15	Кенкеменская	0.39	1.80	11.4	20.5	29.6	0.09	1.0	0.24	1.17	0.97
16	Китчанская	0.16	1.70	25.0	~40	>60	0.10	0.52	0	0	0
17	Кэдэпчинская	0.29	1.88	14.3	23.2	33.1	0.10	0.84	0.25	0.90	0.70
18	Кэдэргинская	0.17	1.06	10.8	15.1	21.4	0.12	1.10	0.31	1.80	1.20
19	Линденская	0.70	3.11	9.3	25.1	40.4	0.05	1.06	0.16	1.16	1.06
20	Мастахская	0.57	3.60	17.1	28.2	53.1	0.05	0.83	0.16	0.85	0.79
21	Меикская	0.69	1.45	4.5	13.1	19.0	0.08	1.45	0.20	1.84	1.68
22	Намская	0.48	2.18	11.3	27.3	33.7	0.08	1.0	0.21	1.14	0.99
23	Нюрбинская	0.48	1.88	9.8	19.7	28.6	0.08	1.10	0.23	1.32	1.12
24	Неджелинская	0.46	2.58	17.0	29.6	42.8	0.07	0.82	0.20	0.84	0.74
25	Нижне-Виллойская	0.56	–	22.5	35.0	48.0	0.06	0.78	0.16	0.77	0.72
26	Нижне-Тюкянская	0.47	1.70	12.2	20.4	29.2	0.09	1.0	0.23	1.15	0.92
27	Олойская	0.38	2.45	15.2	27.5	39.7	0.08	0.83	0.23	0.86	0.72
28	пос. Магарас	0.40	1.86	14.4	22.0	30.0	0.08	0.86	0.23	0.92	0.78
29	пос. Орто-Сурт	0.48	2.19	11.4	22.3	33.3	0.08	0.97	0.21	1.09	0.94
30	Сабо-Хаинская	0.06	3.23	29.0	40.8	61.3	0	0	0	0	0
31	Сангарская	0.07	2.75	25.6	39.8	53.1	0	0	0	0	0
32	Северо-Линденская	0.70	2.04	6.2	11.8	26.5	0.06	1.23	0.18	1.45	1.31
33	Северо-Тюнгская	0.70	1.94	5.8	11.2	25.2	0.08	1.30	0.18	1.56	1.40
34	Синская	0.44	1.35	8.3	16.0	24.3	0.10	1.20	0.24	1.60	1.34
35	Средне-Виллойская	0.55	3.38	15.3	32.6	49.1	0.06	0.87	0.18	0.90	0.83
36	Средне-Мархинская	0.82	0.95	2.0	7.0	11.5	0.08	>1.9	0.20	2.84	2.60
37	Средне-Тюнгская	0.60	3.21	11.6	27.8	43.7	0.06	1.0	0.18	1.09	0.99
38	Сунтарская	0.28	1.13	10.1	15.1	21.4	0.10	1.14	0.26	1.80	1.34
39	Толонская	0.56	1.70	15.0	30.0	45.0	0.06	0.88	0.18	0.93	0.85
40	Урангская	0.62	–	10.0	22.0	35.0	0.05	1.03	0.18	1.15	1.03
41	Уордахская	0.40	2.40	11.4	22.0	33.0	0.09	1.0	0.24	1.16	0.97
42	Усть-Виллойская	0.15	3.38	28.3	42.0	62.1	0.11	0.43	0	0	0
43	Усть-Мархинская	0.49	–	9.5	18.0	27.4	0.08	1.10	0.22	1.34	1.14
44	Усть-Меикская	0.70	1.21	3.6	10.2	15.8	0.08	1.68	0.21	2.32	2.10
45	Хайлахская	0.60	2.23	11.7	22.9	33.7	0.06	0.99	0.18	1.08	0.98
46	Эксеняхская	0.29	–	15.0	26.0	36.0	0.10	0.81	0.26	0.84	0.62

Примечание. H_0 – расположение нулевой изотермы; Γ – средний геотермический градиент в подмерзлотном слое пород; T_1 , $T_{1.5}$, T_2 – средние оценки температуры пород на глубинах 1, 1.5 и 2 км [Семенов, Железняк, 2013, 2018; Семенов, 2018]. Границы ЗСГ диоксида углерода при насыщении пород пресной водой: H_1 – верхняя, H_2 – нижняя. Границы ЗСГ метана: H_1 – верхняя, $H_{2п}$ – нижняя при насыщении пород пресной водой, $H_{2м}$ – нижняя при насыщении пород минерализованной (~35 г/л) водой. Прочерк – нет данных.

чения H_0 , Γ , T_1 , $T_{1,5}$, T_2) приведена в таблице. На данном этапе исследований целью авторов было выяснение основных характеристик размещения ЗСГ метана и диоксида углерода в осадочном чехле Виллойской синеклизы. Поэтому при оценке границ ЗСГ использовались не многочисленные реальные термограммы по отдельным скважинам, а средние термограммы для отдельных площадей. Такие термограммы авторы строили для каждой площади по нескольким точкам: а) $T = -5^\circ\text{C}$ на глубине 0.1 км для всех площадей; б) $T = 0^\circ\text{C}$ на средней для площади глубине расположения подошвы криолитозоны (см. таблицу); в–д) средние для каждой площади значения температуры на глубинах 1, 1.5 или 2 км (см. таблицу).

Зоны стабильности гидратов метана и диоксида углерода в осадочном чехле Виллойской синеклизы

Границы зон стабильности газогидратов наиболее просто определяются графическим методом: посредством сопоставления по глубине и температуре термограмм и фазовых диаграмм, показывающих области существования гидратов того или иного газа при изменении P, T -условий и разной минерализации воды. Для оценки параметров ЗСГ метана и диоксида углерода в породах Виллойской синеклизы авторы использовали графики фазовых диаграмм систем $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ из работы [Дучков и др., 2018]. Пример применения графического метода определения расположения границ ЗСГ метана приведен на рис. 2. Верхняя точка пересечения термограммы и фазовой диаграммы (и верхняя граница ЗСГ метана) располагается в пределах криолитозоны на глубине 240–250 м. Нижняя граница находится в талых породах на глубине 1100 м. Она определяется по пересечению термограммы с фазовой диаграммой для воды с минерализацией 40 г/л, заполняющей породы этого разреза на данной глубине. Судя по геологической колонке, на глубине 1100 м завершается и гидратообразование.

Первые определения параметров зон гидратообразования в осадках 11 площадей Виллойской синеклизы были выполнены по скудным геотермическим данным в 1960–1970 гг. [Макогон, 1974]. Эти расчеты показали, что в осадочном чехле синеклизы существует мощная ЗСГ метана, нижняя граница которой располагается на глубинах 0.8–1.4 км.

В настоящее время наличие обширной базы геотермических данных позволило авторам выполнить более достоверное и детальное изучение ЗСГ в пределах всей Виллойской синеклизы. Для этого, как отмечалось выше, по геотермическим данным (см. таблицу) были построены средние термограммы по каждому из 46 изученных участков синеклизы. В дальнейшем эти средние термограммы сопоставлялись с фазовыми диаграммами,

приведенными в работе [Дучков и др., 2018]. В результате этих операций для каждого участка определены глубины расположения верхних и нижних границ ЗСГ метана и диоксида углерода (для метана определены две нижние границы, соответствующие разной минерализации подземных вод – 0 и 35 г/л). Результаты расчетов также приведены в таблице. Они показывают, что верхние границы ЗСГ диоксида углерода и метана располагаются в верхней части криолитозоны на глубинах 0.05–0.11 и 0.16–0.30 км. Наибольший интерес представляет залегание нижних границ зон стабильности газгидратов. Нижняя граница ЗСГ диоксида углерода H_2 располагается на глубинах 0.5–1.6 км (средняя глубина порядка 1.1 км). Глубина расположения нижней границы ЗСГ метана при залегании пород пресной водой $H_{2п}$ составляет 0.8–2.8 км в зависимости от мощности криолитозоны и величины внутриземного теплового потока при среднем значении $H_{2п} \approx 1.2$ км. В случае минерализованной воды (порядка 35 мг/л) нижняя граница $H_{2м}$ располагается на 0.15–0.20 км выше, на глубинах 0.6–2.6 км, среднее $H_{2м} \approx 1.1$ км. Мощность ЗСГ метана и диоксида углерода практически одинакова и составляет в среднем 1 км. В целом Виллойская синеклиза обладает более мощными ЗСГ метана и диоксида углерода по сравнению с Западной Сибирью [Дучков и др., 2009].

Полученные оценки параметров ЗСГ могут быть использованы для построения схем или про-

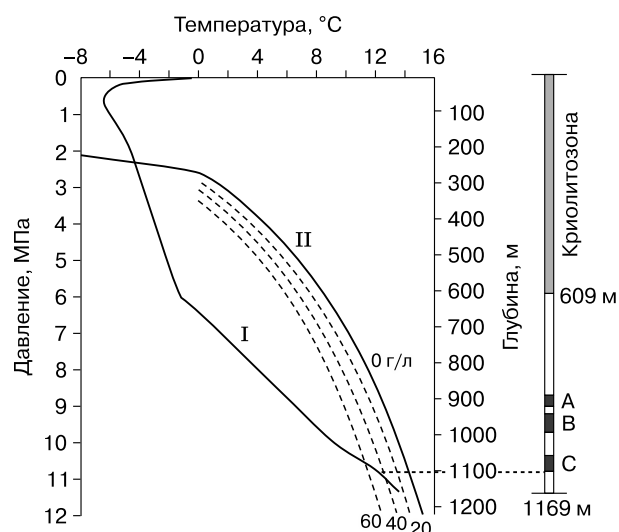


Рис. 2. Результаты определения ЗСГ метана по скважине Mallik 5L-38 (арктическое побережье Канады) [Dallimore, Collett, 2005].

I – термограмма по скважине; II – фазовые диаграммы для системы “метан–вода” при разной минерализации подземных вод: 0, 20, 40, 60 г/л. Справа – упрощенная геологическая колонка по той же скважине: А, В, С – интервалы, содержащие гидраты метана. Пунктирная горизонтальная линия (глубина ~1100 м) – нижняя граница ЗСГ метана при минерализации 40 г/л.

филей, иллюстрирующих расположение в первую очередь нижних границ ЗСГ (верхние границы изменяются незначительно). Необходимо отметить, что, хотя глубины залегания нижних границ H_2 , $H_{2п}$ и $H_{2м}$ могут значительно различаться (см. таблицу), их распределения по площади имеют близкие очертания. При этом границы H_2 и $H_{2м}$ располагаются примерно на одной глубине – выше $H_{2п}$ на 0.10–0.15 км. Здесь авторы ограничились построением и рассмотрением схемы границы $H_{2п}$ (см. рис. 1), наложенной на карту подошвы криолитозоны Вилюйской синеклизы, которая описана в работе [Семенов, 2018]. Схема показывает, что наиболее высоко (0.8–0.9 км) нижняя граница ЗСГ метана поднимается в центральной части синеклизы, в пределах Хапчагайского мегавала. Именно здесь ЗСГ имеет минимальную мощность 0.6–0.7 км. На большей части территории за пределами Хапчагайского мегавала $H_{2п}$ опускается до 1.0–1.4 км. Однако отсутствие геотермических данных восточнее р. Лены не позволяет замкнуть или расширить на восток наметившиеся контуры нижней границы ЗСГ. Максимальные значения мощности ЗСГ метана прогнозируются в западной части синеклизы, где $H_{2п}$ располагается на глубинах более 1.6–2.0 км. В целом распределение нижней границы ЗСГ метана в осадочном чехле синеклизы заметно отличается от расположения

подошвы криолитозоны (см. рис. 1), но хорошо согласуется с латеральным изменением теплового потока [Семенов, Железняк, 2013; Семенов, 2018]. 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 играет главную роль. В качестве примера можно указать на данные по Сунтарской (№ 38) и Эксеняхской (№ 46) площадям (см. таблицу). Средние мощности криолитозоны на этих площадях одинаковы и составляют 0.28–0.29 км, а температуры в подмерзлотном слое существенно различаются, что приводит в итоге к разным оценкам расположения нижней границы ЗСГ метана. На Эксеняхской площади $T_2 = 36^\circ\text{C}$ и $H_{2п} = 0.84$ км, а на Сунтарской площади при $T_2 = 21.4^\circ\text{C}$ нижняя граница ЗСГ, по нашей оценке, опускается почти на 2 км ($H_{2п} = 1.8$ км).

Хапчагайский мегавал является основным газозонным районом Вилюйской синеклизы. Эта огромная структура, расположенная в центре синеклизы (см. рис. 1), наиболее детально изучена бурением, в ее пределах выявлены крупные газовые месторождения (Средне-Вилюйское, Толонское, Мастахское и др.), указанные на широтном профиле (рис. 3), проходящем через основные разведочные площади мегавала (в таблице площади

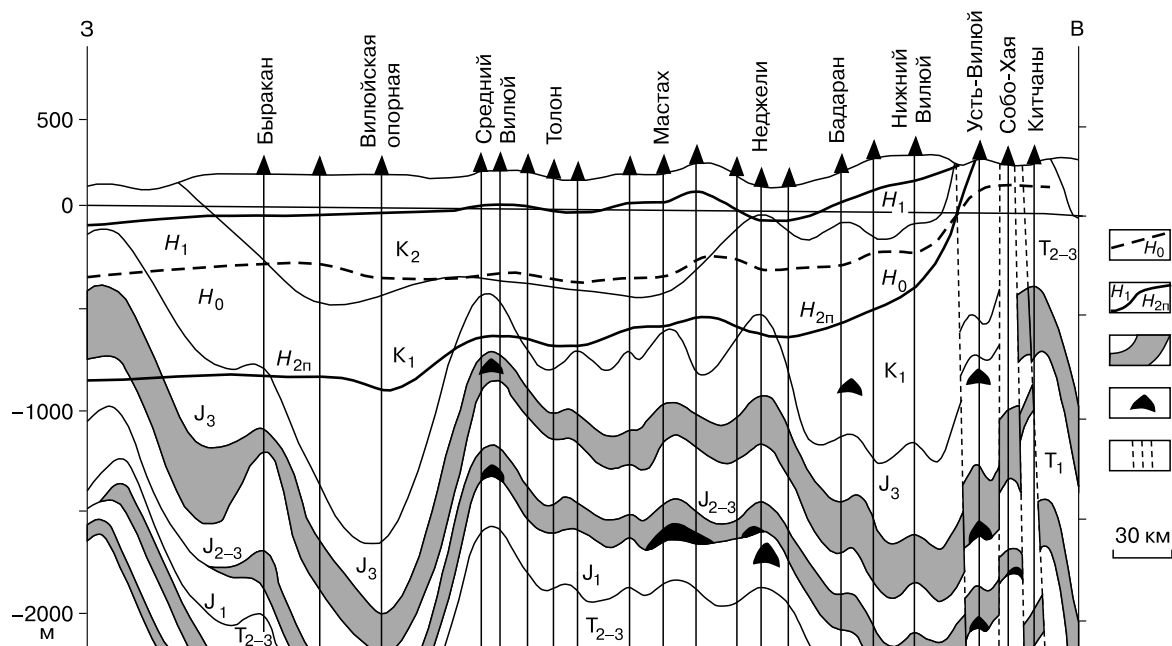


Рис. 3. Широтный мерзлотно-геологический разрез через Хапчагайский нефтегазоносный район (геологические данные по [Ситников и др., 2017]).

1 – нижняя граница криолитозоны H_0 (нулевая изотерма); 2 – верхняя H_1 и нижняя $H_{2п}$ (породы заполнены пресной водой) границы зоны стабильности гидратов метана; 3 – региональные существенно глинистые экраны; 4 – газовые и газоконденсатные залежи; 5 – разрывные тектонические нарушения. Разрез сложен отложениями мела (K_1 , K_2), юры (J_1 , J_{2-3} , J_3) и триаса (T_1 , T_{2-3}) в основном песчано-алевритистого состава.

№ 8, 14, 35, 39, 20, 24, 5, 25, 42, 30, 16). На этом профиле авторы, используя средние данные по отдельным участкам из таблицы, показали расположение в разрезе нулевой изотермы, верхней H_1 и нижней $H_{2п}$ границ ЗСГ метана. На большей западной части профиля (от Быракана до Нижнего Вилюя) нулевая изотерма залегает на глубинах порядка 0.46–0.57 км. Здесь существуют необходимые геотермические условия для существования в разрезе ЗСГ. В крайней восточной части профиля (участки Усть-Вилюйский, Собо-Хая и Китчанский), где зафиксировано возрастание теплового потока [Семенов, Железняк, 2013], мощность мерзлоты резко уменьшается до 0.10–0.15 км. Расчеты показывают, что в этой ситуации нет условий для формирования зоны стабильности гидрата метана.

В западной части профиля верхняя граница H_1 располагается параллельно земной поверхности на глубине около 0.2 км. Нижняя граница $H_{2п}$ (породы заполнены пресной водой) в районе участков Быракан и Вилюйский размещается на глубинах 1.1–1.2 км. К востоку она постепенно поднимается до 0.8 км (участок Нижний Вилюй). Это изменение положения нижней границы, скорее всего, связано с возрастанием в том же направлении величины теплового потока [Семенов, Железняк, 2013]. В целом мощность ЗСГ метана изменяется вдоль профиля от 0.95 км на западе (участок Быракан) до 0.6 км на востоке (участок Нижний Вилюй). Значительная ее часть располагается ниже подошвы криолитозоны в меловых отложениях песчано-алевритистого состава. Именно в этой части ЗСГ наиболее вероятно образование газогидратов при наличии необходимого количества природного газа. В этой связи важно отметить близкое расположение нижней границы ЗСГ метана ($H_{2п}=0.9$ км) к самой верхней газовой залежи (глубина ~1 км) Средне-Вилюйского месторождения (см. рис. 3). Термодинамическая ситуация в этой части профиля напоминает обстановку вокруг Мессояхского газового месторождения в Западной Сибири, в верхней части которого длительное время предполагается наличие гидратов метана [Макогон, 1974; Makogon et al., 2007]. В пределах Хапчагайского мегавала именно в породах Средне-Вилюйской площади складываются наиболее благоприятные условия для формирования скоплений газогидратов. Довольно близко к ЗСГ расположена верхняя газовая залежь месторождения Бадаран. Требуют проверки и другие газоносные районы синеклизы.

Необходимо отметить, что в случае заполнения пород минерализованной водой нижняя граница зоны стабильности гидратов метана $H_{2м}$ будет располагаться выше $H_{2п}$ на 0.1–0.2 км и иметь те же очертания, соответственно на ту же величину будет меньше и мощность ЗСГ метана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые определены общие контуры зон стабильности гидратов метана и диоксида углерода в осадках всей Вилюйской синеклизы. Показано, что в этом регионе существуют благоприятные условия для формирования газовых гидратов: опесчаненный 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 которых практически достигают уже выявленных газовых залежей (Средне-Вилюйское месторождение).

Следует отметить, что рассмотренные оценки параметров ЗСГ как в пределах всей синеклизы, так и, в частности, в породах Хапчагайского мегавала (см. таблицу; рис. 1, 3) требуют дальнейшей проверки. Необходимо уточнить параметры, использованные при расчетах: средние оценки мощности криолитозоны, подмерзлотных температур, минерализации подземных вод. Важной задачей является более детальное изучение параметров ЗСГ метана в пределах отдельных, хорошо разбуренных площадей (в первую очередь в пределах Средне-Вилюйской площади). Выполненные в этом случае уже по реальным термограммам оценки глубин нахождения границ ЗСГ позволяют уточнить их расположение относительно верхних этажей газовых месторождений.

Оценка параметров ЗСГ является первоочередной и необходимой, но не самой важной процедурой при прогнозировании и поисках газогидратов. После ее завершения можно получить представление о расположении слоя пород, в котором имеются необходимые для формирования газовых гидратов 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 также мест возможного расположения залежей газогидратов, намного сложнее. Этому вопросу следует уделить основное внимание при дальнейших поисках площадей с благоприятными условиями для формирования газогидратов в осадочном чехле Вилюйской синеклизы.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта № 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

Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 193 с.

Балобаев В.Т., Девяткин В.Н. Мерзлотно-геотермические условия Западной Якутии // Теплофизические исследования криолитозоны Сибири. Новосибирск, Наука, 1983, с. 22–34.

Горючий лед: как развиваются технологии добычи метана из газовых гидратов в России. ТАСС [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/news/press/press-tass-goryuchiy-led-kak-razvivayutsya-tekhnologii-dobychi-18012018> (дата обращения: 18.01.2018).

Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Пермяков М.Е. Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 62–68.

Дучков А.Д., Соколова Л.С., Железняк М.Н., Аюнов Д.Е. К вопросу о поисках месторождений гидратов метана в областях распространения криолитозоны // Геофиз. технологии, 2018, № 2, с. 27–40.

Железняк М.Н., Семенов В.Р., Шац М.М. Углеводородные ресурсы Вилуйской синеклизы // Недропользование XXI век, 2018, № 6, с. 50–62.

Истомин В.А. Газовые гидраты в природных условиях / В.А. Истомин, В.С. Якушев. М., Недра, 1992, 235 с.

Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М., Недра, 1974, 208 с.

Семенов В.П. Геотемпературное поле и криолитозона Вилуйской синеклизы: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2018, 22 с.

Семенов В.П., Железняк М.Н. Геотермические условия Вилуйской синеклизы // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 3–10.

Семенов В.П., Железняк М.Н. Особенности геотемпературного поля и залегания многолетнемерзлой толщи Вилуйской синеклизы // Природ. ресурсы Арктики и Субарктики, 2018, т. 26, № 4, с. 46–55.

Ситников В.С., Алексеев Н.Н., Павлова К.А. и др. Новейший прогноз и актуализация освоения нефтегазовых объектов Вилуйской синеклизы // Нефтегаз. геология. Теория и практика, 2017, т. 12, № 1, 20 с., URL: http://www.ngtp.ru/rub/6/9_2017.pdf.

Якуцени В.П. Газогидраты – нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы // Нефтегаз. геология. Теория и практика, 2013, т. 8, № 4, 24 с. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/9/50_2013.pdf.

Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.

Dallimore S.R., Collett T.S. (Eds.). Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northern Territories, Canada // Geol. Surv. Canada. Ottawa, 2005, Bull. 585, 140 p.

Makogon Y.F., Holditch S.A., Makogon T.Y. Natural gas hydrates – A potential energy source for the 21st century // J. Petroleum Sci. and Eng., 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.

Song Y., Yang L., Zhao J. et al. The status of natural gas hydrate research in China: a review // Renewable and Sustainable Energy Rev., 2014, No. 31, p. 778–791.

References

Balobaev V.T. Geotermya merzloi zony litosfery severa Azii [Geothermy of the Frozen Zone of the Northern Asia Lithosphere]. Novosibirsk, Nauka, 1991, 193 p. (in Russian).

Balobaev V.T., Devyatkin V.N. Permafrost-geothermal conditions of Western Yakutia. Teplofizicheskie issledovaniya kriolitozony Sibiri [Thermophysical Investigations of the Permafrost Zone of Siberia], Novosibirsk, Nauka, 1983, p. 22–34 (in Russian).

Combustible ice: how to develop technologies for methane production from gas hydrates in Russia. TASS [Electronic resource]. – URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/news/press/press-tass-goryuchiy-led-kak-razvivayutsya-tekhnologii-dobychi-18012018> (submittal date: 18.01.2018).

Duchkov A.D., Sokolova L.S., Ayunov D.E., Permyakov M.E. Assessment of potential of West Siberian permafrost for the carbon dioxide storage. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 4, p. 62–68 (in Russian).

Duchkov A.D., Sokolova L.S., Zheleznyak M.N., Ayunov D.E. The question of the exploration of methane hydrates in the areas of permafrost zones distribution. Geofizicheskie tekhnologii [Geophysical Technologies], 2018, No. 2, p. 27–40 (in Russian).

Zheleznyak M.N., Semenov V.P., Shats M.M. Hydrocarbon resources from the Vilyuiskaya syncline. Nedropolzovanie XXI vek, 2018, No. 6, p. 50–62 (in Russian).

Istomin V.A., Yakushev V.S. Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh [Gas Hydrates in Natural Conditions]. Moscow, Nedra, 1992, 235 p. (in Russian).

Makogon Yu.F. Gidraty prirodnykh gazov [Natural Gas Hydrates], Moscow, Nedra, 1974, 208 p. (in Russian).

Semenov V.P. Geotemperaturnoe pole i kriolitizona Vilyuiskoi sineklisy [Geotemperature Field and Permafrost of the Vilyuy Syncline]. Dissertation abstract. Yakutsk, 2018, 22 p. (in Russian).

Semenov V.P., Zheleznyak M.N. Geothermal conditions in the Vilyuy basin. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 3, p. 3–10 (in Russian).

Semenov V.P., Zheleznyak M.N. Features of the geothermal field and occurrence of permafrost of the Vilyuisk syncline. Prirodnye resury Arktiki i Subarctiki [Natural Resources of the Arctic and Subarctic], 2018, vol. 26, No. 4, p. 46–55 (in Russian).

Sitnikov V.S., Alekseev N.N., Pavlova K.A. et al. The latest forecast and updating of development of oil and gas facilities of Vilyuy syncline. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika [Neftegazovaya Geologiya. Theory and Practice], 2017, vol. 12, No. 1, 20 p. (in Russian).

Yakutseni V.P. Gas hydrates – unconventional gas raw materials, their formation, properties, distribution and geological resources. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika [Neftegazovaya Geologiya. Theory and Practice], 2013, vol. 8, No. 4, 24 p. (in Russian).

Yakushev V.S. Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone [Natural Gas and Gas Hydrates in the Cryolithozone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (in Russian).

Dallimore S.R., Collett T.S. (Eds.). Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northern Territories, Canada. Geol. Surv. Canada. Ottawa, 2005, Bull. 585, 140 p.

Makogon Y.F., Holditch S.A., Makogon T.Y. Natural gas hydrates – A potential energy source for the 21st century. J. Petroleum Sci. and Eng., 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.

Song Y., Yang L., Zhao J. et al. The status of natural gas hydrate research in China: a review. Renewable and Sustainable Energy Rev., 2014, No. 31, p. 778–791.

*Поступила в редакцию 26 марта 2019 г.,
после доработки – 30 мая 2019 г.,
принята к публикации 9 июля 2019 г.*