

## ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В КРИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

УДК 548.562:550.361

DOI: 10.15372/KZ20210303

**ЗОНА СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ МЕТАНА  
В РАЙОНЕ СРЕДНЕВИЛЮЙСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
(ВИЛЮЙСКАЯ СИНЕКЛИЗА)**

**А.Д. Дучков<sup>1</sup>, В.П. Семенов<sup>2</sup>, Л.С. Соколова<sup>1</sup>, А.И. Сивцев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия; [duchkovad@ipgg.sbras.ru](mailto:duchkovad@ipgg.sbras.ru)

<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; [semenov.vp@rambler.ru](mailto:semenov.vp@rambler.ru)

<sup>3</sup>ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча», 677018, Якутск, ул. Аммосова, 18, Россия; [sivtsevai@tyngd.rosneft.ru](mailto:sivtsevai@tyngd.rosneft.ru)

Представлены результаты определения нижней границы зоны стабильности гидратов метана по геотермическим измерениям в 22 скважинах Средневилюйского газоконденсатного месторождения. Применен графический метод, заключающийся в сопоставлении термограмм с фазовой диаграммой, характеризующей равновесные условия образования гидратов метанового газа из верхних залежей месторождения. В настоящее время верхние газовые залежи месторождения (глубина 1035 и 1057 м) располагаются ниже зоны стабильности всего на 60–70 м. Выполнена приближенная оценка изменений расположения нижней границы зоны стабильности гидратов метана в позднем неоплейстоцене–голоцене. Показано, что в холодные периоды (~130 и 15 тыс. лет назад) зона стабильности могла опускаться ниже верхних газовых залежей Средневилюйского месторождения на 20–50 м.

**Ключевые слова:** Вилюйская синеклиза, Средневилюйское газоконденсатное месторождение, многолетнемерзлая толща, зона стабильности гидратов метанового природного газа, границы зоны, поздний неоплейстоцен–голоцен.

**ZONE OF STABILITY OF METHANE HYDRATES IN THE AREA  
OF THE SREDNEVILYUISK GAS-CONDENSATE FIELD (VILYUI SYNECLISE)**

**A.D. Duchkov<sup>1</sup>, V.P. Semenov<sup>2</sup>, L.S. Sokolova<sup>1</sup>, A.I. Sivtsev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,  
Akademika Koptuyuga prs. 3, Novosibirsk, 630090, Russia; [duchkovad@ipgg.sbras.ru](mailto:duchkovad@ipgg.sbras.ru)

<sup>2</sup>Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Permafrost str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; [semenov.vp@rambler.ru](mailto:semenov.vp@rambler.ru)

<sup>3</sup>TAAS-Yuryakh Neftegazodobycha LLC, Ammosova str. 18, Yakutsk, 677018, Russia; [sivtsevai@tyngd.rosneft.ru](mailto:sivtsevai@tyngd.rosneft.ru)

The results of determining the lower boundary of the methane hydrate stability zone based on geothermal measurements in 22 wells of the Srednevilyuisk gas-condensate field have been presented. A graphical method has been applied, which consisted in comparing the thermograms with a phase diagram characterizing the equilibrium conditions of formation for the methane gas hydrates contained in the upper deposits of the field. At present, the upper gas deposits of the field (depths of 1035 and 1057 m) are located only 60–70 m below the stability zone. An approximate assessment of changes in the location of the lower boundary of the stability zone of methane hydrates in the Late Neopleistocene–Holocene has been made. It has been revealed that during the cold periods (~130 and 15 thousand years ago), the stability zone could fall below the upper gas deposits of the Srednevilyuisk field by 20–50 m.

**Key words:** Vilyui syneclyse, Srednevilyuisk gas-condensate field, permafrost, methane natural gas hydrate stability zone, boundaries of the zone, Late Neopleistocene–Holocene.

**ВВЕДЕНИЕ**

Природные газовые гидраты могут образовываться и сохраняться только в тех слоях горных пород (зонах стабильности гидратов), в которых существуют благоприятные для этого термобарические ( $P$ – $T$ ) условия [Истомин, Якушев, 1992]. Современные зоны стабильности газогидратов в породах территории Северного полушария

сформировались при похолодании климата в плейстоцене и возникновении криолитозоны. Образование и развитие зон стабильности газогидратов на континентах в целом повторяют эволюцию многолетнемерзлой толщи (ММТ) [Романовский, 1993].

В работе [Дучков и др., 2019] было установлено современное расположение границ зон ста-

бильности гидратов метана (ЗСГМ) в породах осадочного чехла Вилюйской синеклизы, перекрытого с поверхности криогенной толщей мощностью от 480 до 650 м. В ЗСГМ синеклизы входят огромные массивы мерзлых и талых пород мелового и верхнеюрского возраста, залегающие на глубинах от 200 до 1200 м. В регионе открыты многоэтажные газовые и газоконденсатные месторождения [Ситников и др., 2017], верхние залежи которых приближаются к нижней границе ЗСГМ. Наибольший интерес в этом отношении представляет Средневилюйское газоконденсатное месторождение (ГКМ), где нижняя граница ЗСГМ располагается, по нашим расчетам, всего на 100 м выше верхней газовой залежи [Дучков и др., 2019]. Для уточнения взаиморасположения зоны стабильности гидратов метана и верхней газовой залежи авторами выполнено более детальное изучение параметров ЗСГМ в породах этого месторождения. Сравнительно недавно подобное исследование было выполнено для соседнего Мастахского ГКМ [Сивцев, Рожин, 2011].

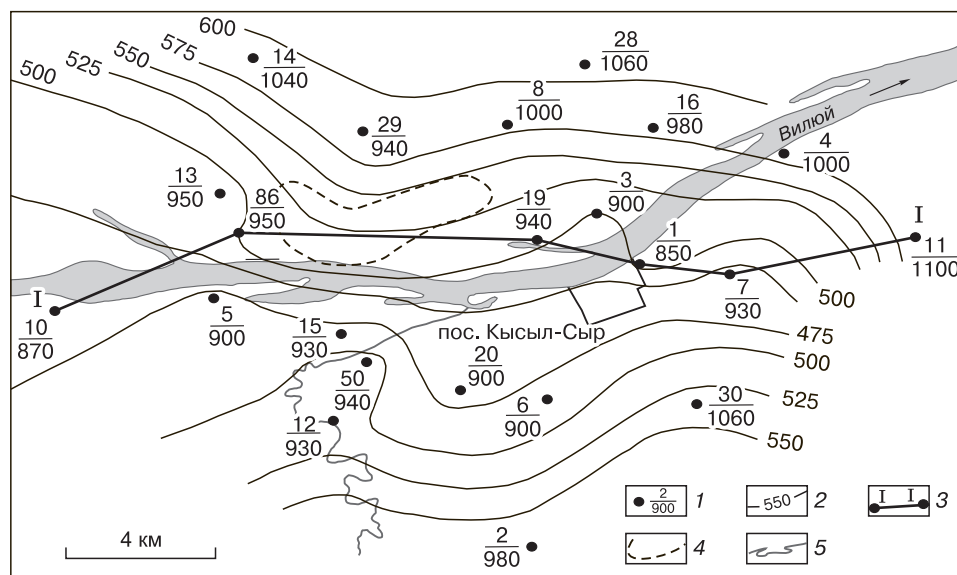
Известно, что в позднем неоплейстоцене–голоцене климат Сибири претерпевал существенные изменения, происходили частые чередования теплых и ледниковых эпох, во время которых среднегодовая температура опускалась ниже современной на 8–15 °С [Глобальные изменения..., 2008; Фотиев, 2020]. Вариации климата неизбежно должны были вызывать соответствующие изменения мощ-

ности ММТ и зон стабильности газовых гидратов. В работе [Бондарев и др., 2019] впервые выполнено математическое моделирование возможных изменений мощности криолитозоны в районах Вилюйской синеклизы в позднем неоплейстоцене–голоцене (от 200 тыс. лет назад до настоящего времени). Авторы воспользовались полученными результатами и провели ориентировочную оценку динамики смещений нижней границы ЗСГМ в районах Вилюйской синеклизы в позднем неоплейстоцене–голоцене и вероятности попадания в этот период верхних газовых залежей Средневилюйского ГКМ в ЗСГМ (при их неизменном расположении по глубине).

### Средневилюйское газоконденсатное месторождение

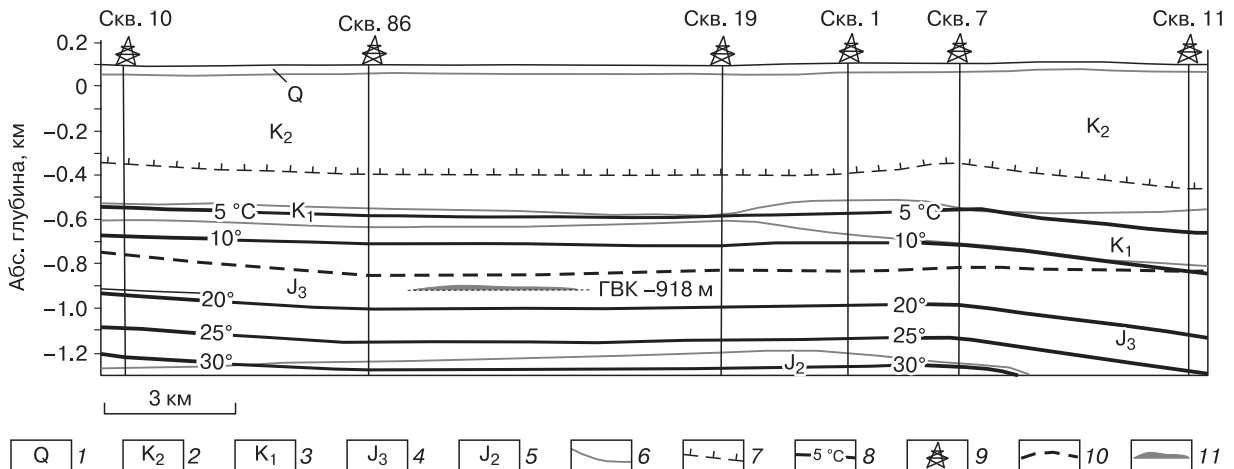
Средневилюйское ГКМ расположено в 60 км к востоку от г. Вилюйска, Республика Саха (Якутия), на правом и левом берегах р. Вилюй (рис. 1).

В тектоническом отношении месторождение приурочено к одноименной брахиантиклинали на Средневилюйско-Толонском куполовидном поднятии западного склона Хапчагайского мегавала. Месторождение – многозалежное. Газоносными являются пермские, триасовые и юрские отложения. Основные залежи расположены в породах нижнего триаса на глубинах 2332–2590 м. На разрезе по широтному профилю I–I (рис. 2) видно, что верхняя часть его, в которой располагаются ММТ и ЗСГМ, сложена терригенными отложени-



**Рис. 1.** Схема расположения нижних границ криолитозоны и зоны стабильности гидратов метана в породах Средневилюйского ГКМ.

1 – скважины, для которых выполнены оценки глубины залегания нижней границы ЗСГМ (в числителе – номер скважины, в знаменателе – глубина залегания нижней границы ЗСГМ, м); 2 – изолинии мощности криолитозоны, м; 3 – геолого-геофизический разрез I–I; 4 – проекция газовой залежи верхнеюрского месторождения ( $J_3-I$ ) на земную поверхность; 5 – поверхностные водотоки.



**Рис. 2. Широтный геолого-геофизический разрез Средневилуийского ГКМ.**

1 – четвертичные отложения (Q); 2 – пески и песчаники с прослоями алевролитов и глин ( $K_2$ ); 3 – переслаивание сероцветных песчаников с алевролитами, аргиллитами и глинами ( $K_1$ ); 4 – переслаивание песчаников с аргиллитами и алевролитами ( $J_3$ ); 5 – песчаники с подчиненным чередованием пластов аргиллитов и алевролитов ( $J_2$ ); 6 – границы геологических комплексов; 7 – нижняя граница криолитозоны; 8 – изотермы, °C; 9 – скважина и ее номер; 10 – нижняя граница ЗСГМ; 11 – расположение газовой водяной контакта (ГВК) верхнеюрской газовой залежи ( $J_3$ -I).

ями (песчаники с прослоями алевролитов и аргиллитов) верхнеюрского–мелового возраста, которые насыщены пресными или солоноватыми водами [Геология..., 1981]. В работе [Грубов, Славин, 1971] приведены результаты изучения подземных вод непосредственно в Средневилуийском районе. Они свидетельствуют, что породы верхней юры и мела насыщены пресными и слабосоленатыми водами, минерализация которых составляет в среднем 0.5–2.2 г/л, водообильность пород определяется пористостью, достигающей 27–33 %, в водах растворен газ метанового состава (до 95–99 %).

Верхняя пластовая сводовая залежь ( $J_3$ -I) Средневилуийского ГКМ приурочена к нижней части верхнеюрской марькчанской свиты, сложенной песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов. Геологическая модель залежи построена по результатам бурения и геофизическим данным. По этой модели газовой водяной контакт (ГВК) залежи расположен на глубине ~1035 м (абс. глубина -918 м), высота залежи 18.4 м, глубина ее верхней границы ~1016 м, площадь газоносности 10.9 км<sup>2</sup>. Пространственное положение верхней залежи (проекция на земную поверхность газовой водяной контакта) показано на рис. 1. Контур залежи дан также на разрезе вдоль профиля I-I (см. рис. 2). Примерно на 20 м ниже, в нижневилуийской свите, выявлена вторая верхнеюрская залежь ( $J_3$ -II), ГВК которой установлен на глубине ~1057 м (абс. глубина -940 м). Остальные залежи Средневилуийского ГКМ расположены на глубинах более 1400 м.

### Распределение температуры в верхней части разреза Средневилуийского ГКМ

Температурный режим осадочных пород Средневилуийского месторождения изучен достаточно детально в результате многолетних геотермических исследований, проведенных здесь сотрудниками ИМЗ СО РАН [Семенов, Железняк, 2013; Железняк, Семенов, 2020]. В табл. 1 приведены значения мощности криолитозоны и температуры пород на глубине 1 км по 22 скважинам на территории месторождения.

По этим данным построена схема расположения нижней границы криолитозоны ( $H_m$ ) в пределах Средневилуийского ГКМ (см. рис. 1). На разрезе (см. рис. 2) указаны расположение границы  $H_m$  и распределение температуры в породах ниже криолитозоны. В изученном районе мощность криолитозоны изменяется от 450 до 630 м при среднем значении 520 м. В центральной части площади она составляет 460–520 м, зафиксировано ее возрастание в северном, восточном и южном направлениях до 570–630 м.

Глубина границы  $H_m$  в основном определялась по расположению нулевой геоизотермы на термограммах скважин. Этот метод подтверждается многочисленными экспериментальными данными, свидетельствующими о том, что замерзание (или оттаивание) пресных пластовых вод происходит при достижении температуры 0 °C. По нескольким скважинам (4, 8, 20) при оценке  $H_m$  использовались данные стандартного каротажа.

Значения температуры на глубине 1 км ( $T_1$ ) определены для 19 скважин по термограммам из

Таблица 1. Мощности криолитозоны и глубины залегания нижней границы ЗСГМ по скважинам Средневиллойского ГКМ

Номер скважины	$H_M$ , м	$T_1$ , °С	$H_T$ , м	Номер скважины	$H_M$ , м	$T_1$ , °С	$H_T$ , м
1	500	17	930	14	570	14.5	1040
2	580	16	980	15	480	17	930
3	500	18.2	900	16	560	16	980
4	560	–	1000*	19	510	17	940
5	480	18	900	20	460	–	900*
6	480	18	900	28	630	13.8	1060
7	460	17	930	29	590	15	940
8	560	–	1000*	30	540	14	1060
10	450	19	870	50	510	17	940
11	560	12	1100	86	500	16.6	950
12	510	17.5	930	Среднее	520	16.3	960
13	480	16.5	950				

\* Значения определены по формуле  $H_T = 470 + 0.94H_M$ .

Примечание.  $H_M$  – мощность криолитозоны (глубина залегания нулевой изотермы) [Железняк, Семенов, 2020];  $T_1$  – температура пород на глубине 1 км;  $H_T$  – глубина расположения нижней границы ЗСГМ.

архива Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН. В пределах Средневиллойского ГКМ температура на этой глубине изменяется от 13.8 до 19.0 °С, ее среднее значение составляет 16.3 °С. В подмерзлотном слое температура пород быстро увеличивается с глубиной (см. рис. 2): нулевая геотерма расположена вдоль профиля примерно на глубине 0.5 км ниже поверхности, изотермы 5 и 30 °С – на глубинах 0.7 и 1.4 км. На глубине 2 и 3 км средние значения температуры составляют  $T_2 = 49$  °С и  $T_3 = 83$  °С; средний геотермический градиент в подмерзлотных породах оценивается в 3.38 °С/100 м, а средний тепловой поток в пределах ГКМ составляет около 60 мВт/м<sup>2</sup> [Железняк, Семенов, 2020].

### Зона стабильности гидратов метана в осадочных породах Средневиллойского ГКМ

Для оценки положения границ ЗСГМ в осадках Средневиллойского ГКМ применен графический метод, заключающийся в сопоставлении термограмм с равновесной кривой гидратообразования (фазовой диаграммой) для реального состава газа в верхней залежи и пресной воды. Точки пересечения термограмм и фазовой диаграммы, построенных в одной системе координат (глубина и температура) и в одном масштабе, дают оценки глубины расположения верхней и нижней границ зоны стабильности. При проведении расчетов принималась гидростатическая модель изменения давления с глубиной.

В работе рассматривалось в основном расположение нижней границы ЗСГМ, так как ранее

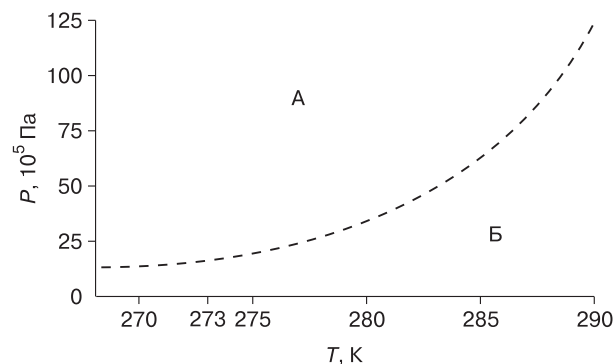


Рис. 3. Равновесные условия гидратообразования (фазовая диаграмма).

Состав газа (мол.%):  $CH_4$  – 96.69,  $C_2H_6$  – 2.01,  $C_3H_8$  – 0.27,  $C_4H_{10}$  – 0.14,  $CO_2$  – 0.2,  $N_2$  – 0.64 [Сивцев, Рожин, 2011]. А – область гидратообразования метана, Б – область двухфазного состояния вода–газ или лед–газ.

[Дучков и др., 2019] было показано, что в пределах Виллойской синеклизы верхняя граница ЗСГМ повсеместно находится на глубинах 180–200 м.

Согласно архивным данным, газ верхней залежи Средневиллойского ГКМ состоит из  $CH_4$  (97.05 %) и других компонентов, набор которых практически аналогичен составу газа Мастахского ГКМ, для которого в работе [Сивцев, Рожин, 2011] выполнена оценка равновесных условий гидратообразования. Соответствующая фазовая диаграмма приведена на рис. 3. Расчеты сделаны для пресной воды по методике, представленной в работе [Sloan, 1997].

С помощью этой фазовой диаграммы и значений  $H_M$ ,  $T_1$  (см. табл. 1) выполнены оценки глубины расположения нижней границы ЗСГМ по 19 скважинам. Сопоставление значений  $H_M$  и  $H_T$  показало наличие хорошей линейной корреляции между этими величинами:  $H_T = 470 + 0.94H_M$  (коэффициент детерминации  $R^2 = 0.54$ ). Полученное соотношение использовано для оценки  $H_T$  по трем скважинам (4, 8, 20), в которых не удалось выполнить температурные измерения. Значения  $H_T$  по всем скважинам приведены в табл. 1 и на рис. 1. На рис. 2 видно, что нижняя граница ЗСГМ располагается в подмерзлотных породах вдоль профиля I–I с запада на восток на глубинах 870–1100 м, занимая практически положение геоизотермы 15 °С. Средняя глубина залегания  $H_T$  ~ 960 м. В зону стабильности гидратов метана входят мерзлые и талые песчано-алевритовые породы мелового возраста. Наиболее высоко (до 900–950 м)  $H_T$  поднимается в центральной части месторождения (мощность ЗСГМ снижается здесь до 700–750 м). К северу, востоку и югу нижняя граница ЗСГМ опускается до 1000–1100 м. В пределах контура верхней газовой залежи она располагается на глубинах 940–950 м. От верхней гра-



ницы залежи (на глубине ~1016 м) ЗСГМ отделяет всего 70–80 м пород.

Таким образом, более детальное изучение параметров ЗСГМ в породах Средневилюйского ГКМ подтвердило, что в настоящее время верхняя газовая залежь этого месторождения расположена глубже нижней границы ЗСГМ.

Можно предположить, что в предшествующие более холодные (ледниковые) эпохи мощность ЗСГМ была больше современной, и она могла еще более приблизиться к верхней залежи Средневилюйского ГКМ или даже захватить ее. Авторы попытались оценить эту возможность, используя результаты выполненного в Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) СО РАН моделирования изменений мощности криогенной толщи в прошлые эпохи в Вилюйской синеклизе [Бондарев и др., 2019].

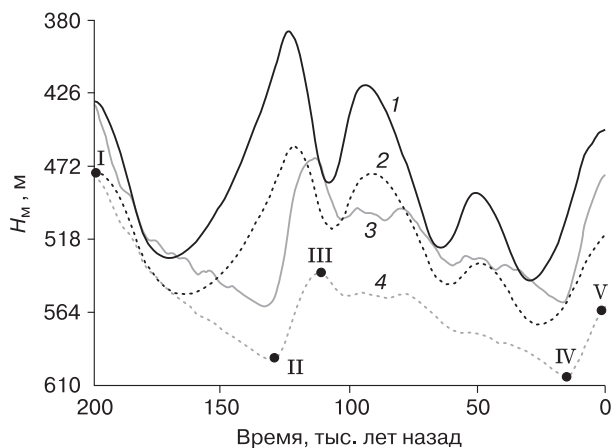
#### Приближенная оценка изменений границ ЗСГМ в породах Средневилюйского ГКМ в позднем неоплейстоцене–голоцене

Математическое моделирование возможных изменений параметров ММТ Вилюйской синеклизы в прошлые эпохи выполнено в работе [Бондарев и др., 2019] для массива горной породы мощностью 3 км и различных условий. На верхней границе массива в качестве граничных условий использованы в одном случае изменения отклонений температуры воздуха от современной температуры на границе льдообразования в Антарктиде [Котляков, Лориус, 2000], в другом – изменения температуры, полученные в результате геокриологической интерпретации палеоклиматической летописи на основе комплексных исследований содержания створок диатомовых водорослей и биогенного кремнезема в донных осадках оз. Байкал [Фотиев, 2009]. Два разных условия принимались и на нижней границе массива: 1) постоянная температура (83 °С); 2) постоянный внутриземной тепловой поток (60 мВт/м<sup>2</sup>). Оба условия означают, что распределение температуры в подмерзлотных породах массива в течение всего периода моделирования соответствовало современному. Результаты расчетов (изменения  $H_M$  при разных условиях в период от 200 тыс. лет назад до настоящего времени) приведены на рис. 4.

Расчеты проведены для района Средневилюйского ГКМ, где измерены температуры, тепловые потоки и тепловые свойства пород. Моделирование показало, что в районе Средневилюйского ГКМ (и, видимо, во всей Вилюйской синеклизе) в позднем неоплейстоцене–голоцене существовала криолитозона, по мощности близкая к современной. Она образовалась более 200 тыс. лет назад и существовала не только в холодные, но и в теплые эпохи. Разные условия задания температуры на границах массива приводят к существенным

различиям расположения нижней границы криолитозоны, хотя в каждом случае  $H_M$  за 200 тыс. лет перемещалась не более чем на 100–140 м. На положение  $H_M$  больше влияет температура на нижней границе массива и меньше выбранный сценарий изменения климата. Более жесткие условия (более мощная криолитозона) прогнозируются при задании на нижней границе массива постоянного значения теплового потока.

Оценку расположения нижней границы ЗСГМ в породах в этот период можно выполнить по каждому из графиков  $H_M$ . Однако предпочтительнее для дальнейшей работы выбрать наиболее реалистичный график. Критерием выбора может служить, например, соотношение современных измеренных и расчетных значений средней мощности криолитозоны. По разным оценкам, в настоящее время средняя мощность криолитозоны в пределах Средневилюйского ГКМ оценивается в 520–550 м (см. табл. 1) [Дучков и др., 2019]. Из рис. 4 следует, что ближе всего к средним измеренным значениям  $H_M$  находятся графики 2 и 4 ( $H_M = 518$  и 560 м соответственно), а графики 1 и 3 показывают более низкие значения  $H_M$ . Из графиков 2 и 4 самое глубокое промерзание пород в прошлые эпохи прогнозирует 4. График 4 был выбран авторами для оценки возможных изменений параметров ЗСГМ в пределах месторождения.



**Рис. 4. Изменение расположения нижней границы криолитозоны ( $H_M$ ) в Средневилюйском районе при различных сценариях изменения климата и температурных условиях на нижней границе модельного массива [Бондарев и др., 2019].**

1, 2 – температура пород на верхней границе массива определена по байкальской летописи [Фотиев, 2009]; 3, 4 – температура пород на верхней границе массива определена по данным изучения ледяного ядра Антарктиды [Котляков, Лориус, 2000]; 1, 3 – на нижней границе массива (3000 м) сохраняется постоянная температура горных пород (83 °С); 2, 4 – на нижней границе сохраняется постоянный тепловой поток (60 мВт/м<sup>2</sup>). I–V – точки, для которых выполнены оценки расположения нижней границы ЗСГМ.

Таблица 2. Положение нижней границы ЗСГМ в породах Средневилюйского ГКМ

Номер точки (см. рис. 4)	Время, тыс. лет назад	$H_M$ , м	$T_1$ , °С	$H_T$ , м
I	200	480	17.7	910
II	130	595	13.7	1060
III	112	538	15.6	990
IV	15	610	13.3	1080
V	0	560	14.8	1010

Примечание. Температура пород на глубине 1 км рассчитана по формуле  $T_1 = 0.0338(1000 - H_M)$ .

Для упрощения оценки положения  $H_T$  выполнялись только в экстремальных и конечных точках (I–V), параметры которых указаны в табл. 2. Такой подход позволяет определить наиболее интересную информацию о максимальных смещениях границы  $H_T$  во времени.

Для оценки изменений глубины залегания нижней границы ( $H_T$ ) зоны стабильности гидрата метана в рассматриваемый период достаточно знать расположение нулевой изотермы ( $H_M$ ) и значение температуры на глубине 1 км ( $T_1$ ). Оценки значений  $T_1$  выполнены по упомянутому ранее среднему значению геотермического градиента в подмерзлотных породах Средневилюйского ГКМ, равному 3.38 °С/100 м. Такой выбор градиента обоснован принятым при моделировании условием на нижней границе (3 км) массива пород, а именно сохранением теплового потока, равного современному, в течение всего временного периода (200 тыс. лет). Это условие предполагает практическую неизменность температурного поля подмерзлотных пород в тот же период. Значения  $T_1$  (°С) определялись по формуле  $T_1 = 0.0338(1000 - H_M)$ . При оценках расположения нижней границы ЗСГМ применен графический метод: геотермические данные ( $H_M, T_1$ ) сравнивались с фазовой диаграммой, представленной на рис. 3. Результаты расчетов  $T_1$  и  $H_T$  приведены в табл. 2. Графики возможных максимальных перемещений  $H_M$  и  $H_T$  в неоплейстоцене–голоцене представлены на рис. 5.

Нижние границы криолитозоны и ЗСГМ 200 тыс. лет назад располагались на глубинах 480 и 910 м соответственно, т. е. занимали самое высокое положение. В последующем мощности многолетнемерзлых пород и зоны стабильности гидратов метана в целом возрастали под влиянием нескольких похолоданий. Максимально глубоко  $H_M$  (до 595–610 м) и  $H_T$  (до 1060–1080 м) опускались 130 и 15 тыс. лет назад. В обоих случаях ЗСГМ могла захватывать обе верхнеюрские залежи Средневилюйского ГКМ, газоводяные контакты которых располагаются на глубинах 1035 и 1057 м. В последний холодный период  $H_T$  могла опус-

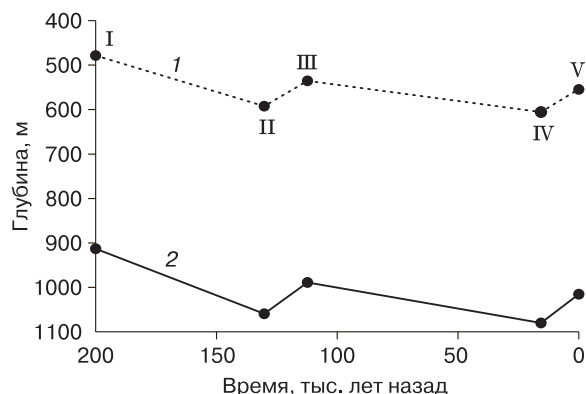


Рис. 5. Расположение нижних границ криолитозоны и зоны стабильности гидратов метана в породах Средневилюйского района в отдельных временных точках I–V позднего неоплейстоцена–голоцена.

1 – нижняя граница криолитозоны [Бондарев и др., 2019],  
2 – нижняя граница ЗСГМ.

таться на 20 м ниже второй верхнеюрской ( $J_3$ –II) залежи.

Следует отметить, что использованный графический метод дает возможность решить поставленную основную задачу – оценить динамику изменений глубины залегания нижней границы ЗСГМ в неоплейстоцене–голоцене без учета запаздывания во времени смещений  $H_T$  относительно  $H_M$ . Дальнейшее развитие метода моделирования динамики параметров ММТ и ЗСГМ может, на наш взгляд, привести к уточнению полученных оценок.

#### Сопоставление результатов расчетов с геологической информацией об изменениях климата

Представляет интерес сопоставить полученную информацию о возможных изменениях положения в разрезе нижних границ криолитозоны и ЗСГМ (см. табл. 2, рис. 5) с описанием основных климатических событий в позднем неоплейстоцене–голоцене [Глобальные изменения..., 2008; Фотиев, 2020]. В этих работах показано, что глобальные палеоклиматические события в позднем неоплейстоцене–голоцене, установленные по отношению изотопов кислорода в керне морских отложений, по содержанию биогенного кремнезема в осадках оз. Байкал, по изучению ледового керна Антарктиды и по свойствам почвенных разрезов Сибири, достаточно хорошо согласуются друг с другом. В дальнейшем будем сравнивать значения  $H_M$  и  $H_T$ , полученные в результате анализа графика 4 (см. рис. 4), с характеристиками сменяющих друг друга теплых и холодных периодов палеоклимата Земли, установленных по материалам

глубоководного бурения (каждый период характеризуется отдельной морской изотопно-кислородной стадией (МИС)) и зафиксированных в климатической истории Западно-Сибирского региона [Глобальные изменения..., 2008], а также в геокриологической летописи неоплейстоцена Сибири (термохроны – теплые периоды, криохроны – холодные) [Фотиев, 2009, 2020].

Минимальные значения  $H_M$  и  $H_T$  установлены 200 тыс. лет назад. В это время заканчивался теплый климатический период (МИС-7, Ширгинский термохрон) и начинался длительный холодный этап (МИС-6, Тазовский криохрон), длившийся от 187 до 130–128 тыс. лет назад. В течение этого этапа происходило постепенное погружение границ  $H_M$  и  $H_T$  вплоть до максимальных значений, достигнутых примерно 130 тыс. лет назад. Похолодание сменилось теплым периодом (МИС-5, Казанцевское межледниковье в Западной Сибири, Казанцевский термохрон), длившимся от 128 до 70 тыс. лет. В течение этого теплого периода сначала произошел резкий подъем  $H_M$  и  $H_T$  (112 тыс. лет назад), а затем стабилизация и медленное погружение границ в связи с постепенным уменьшением средних поверхностных температур. Примерно 70 тыс. лет назад  $H_M$  и  $H_T$  достигли современных значений и продолжили погружение под влиянием снижения поверхностных температур в холодные периоды, случившегося 70–58 тыс. лет назад (МИС-4, Ермаковское оледенение в Западной Сибири, начало Зыряно-сартанского криохрона) и 32–11 тыс. лет назад (МИС-2, Сартанское оледенение). Максимальных значений  $H_M$  и  $H_T$  достигли 15 тыс. лет назад примерно к концу Сартанского ледникового периода. Впоследствии начался подъем границ  $H_M$  и  $H_T$  до современного уровня под влиянием потепления климата в голоцене (11–0 тыс. лет назад, МИС-1).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований определены параметры зоны стабильности гидратов метана в породах Средневилюйского ГКМ Вилюйской синеклизы. Показано, что здесь существуют весьма благоприятные условия для формирования скоплений метангидратов: наличие песчаных коллекторов, повышенное содержание растворенного в воде метана по всему разрезу [Ситников и др., 2017], мощная зона стабильности гидратов. Впервые для условий Вилюйской синеклизы выполнена приближенная оценка возможных изменений расположения нижней границы ЗСГМ в позднем неоплейстоцене–голоцене с использованием наиболее вероятного, с точки зрения авторов, сценария эволюции мощности криолитозоны из работы [Бондарев и др., 2019]. Расчеты показали, что в холодные периоды, примерно 130 и 15 тыс. лет назад, нижняя граница ЗСГМ

могла опускаться ниже двух верхнеюрских залежей (глубины газоводяных контактов 1035 и 1057 м) Средневилюйского ГКМ. Для уточнения полученных оценок необходимо дальнейшее развитие методик прогнозирования изменений параметров как ЗСГМ, так и криолитозоны под влиянием климатического фактора.

В заключение можно отметить, что полученные авторами оценки изменений в неоплейстоцене–голоцене нижних границ криолитозоны и ЗСГМ (см. рис. 4, график 4, рис. 5) в целом хорошо коррелируют с известными данными о глобальных палеоклиматических событиях в этот временной период. Такое же заключение можно сделать и относительно сценария, иллюстрируемого графиком 3 (см. рис. 4). В то же время очевидно, что характер изменений нижней границы криолитозоны, показанный графиками 1 и 2 на рис. 4, не соответствует описанным климатическим событиям. Это позволяет предположить, что наиболее близкие к реальности результаты при моделировании динамики мощности криолитозоны в прошлые эпохи получены в работе [Бондарев и др., 2019] при использовании в качестве верхнего граничного условия изменений относительной температуры на границе льдообразования в Антарктиде [Котляков, Лориус, 2000].

**Благодарности.** Исследования выполнены при поддержке в 2018–2019 гг. Интеграционного проекта № 6 “Палеорекострукция теплового поля и криолитозоны Вилюйской синеклизы в позднем плейстоцене–голоцене” в рамках Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН “Междисциплинарные интеграционные исследования” на 2018–2020 гг.

### Литература

- Бондарев Э.А., Рожин И.И., Аргунова К.К. Моделирование геотемпературного поля и мощности криогенной толщи в различных областях Вилюйской синеклизы // Теплофизика и энергетика арктических и субарктических территорий: расшир. тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию со дня рождения Р.И. Гаврильева (Якутск, 24–27 июня 2019 г.). Якутск, ИМЗ СО РАН, 2019, с. 11–16.
- Геология нефти и газа Сибирской платформы / Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М., Недра, 1981, 376 с.
- Глобальные изменения климата и природной среды позднего кайнозоя в Сибири / Под ред. А.П. Деревянко. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008, 511 с.
- Грубов Л.А., Славин В.И. Сравнительная оценка гидрогеологических условий различных районов Якутского артезианского бассейна в связи с нефтегазоносностью // Гидрогеологические исследования в нефтегазоносных районах: сб. науч. тр. Л., ВНИГРИ, 1971, с. 184–202.
- Дучков А.Д., Железняк М.Н., Соколова Л.С., Семенов В.П. Зоны стабильности гидратов метана и диоксида углерода в осадочном чехле Вилюйской синеклизы // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 6, с. 19–26.

**Железняк М.Н.** Геотемпературное поле и криолитозона Вилуйской синеклизы / М.Н. Железняк, В.П. Семенов. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2020, 123 с.

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

**Котляков В.М., Лориус К.** Четыре климатических цикла по данным ледяного ядра из глубокой скважины на станции Восток в Антарктиде // Изв. РАН. Сер. геогр., 2000, № 1, с. 7–19.

**Романовский Н.Н.** Основы криогенеза литосферы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 336 с.

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

**Сивцев А.И., Рожин И.И.** Обоснование потенциальных скоплений газа под мерзлотно-гидратным флюидопором // Проблемы инженерного мерзлотоустройства: Материалы IX Междунар. симпозиума (Мирный, 3–7 сент. 2011 г.). Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011, с. 422–428.

**Ситников В.С., Алексеев Н.Н., Павлова К.А. и др.** Новейший прогноз и актуализация освоения нефтегазовых объектов Вилуйской синеклизы // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2017, т. 12, № 1, 20 с.

**Фотиев С.М.** Геокриологические летописи Сибири // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 3, с. 3–16.

**Фотиев С.М.** Дискуссионные проблемы геокриологии: обзор достижений // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 3, с. 3–17.

**Sloan E.D.** Clathrate Hydrates of Natural Gases. N.Y., Basel, Hong-Kong, Marcel Dekker, Inc., 1997, 705 p.

## References

Bondarev E.A., Rozhin I.I., Argunova K.K. Modeling of the geotemperature field and the power of the cryogenic layer in various areas of the Vilyuisk syncline. In: Proceeding of conference “Thermophysics and power engineering of the Arctic and subarctic territories” (Yakutsk, June 24–27, 2019). Yakutsk, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 2019, p. 11–16 (in Russian).

Geologiya nefti i gaza Sibirskoi platform [Geology of Oil and Gas of the Siberian Platform]. A.E. Kontorovich, V.C. Surkov, A.A. Trofimuk (Eds.). Moscow, Nedra, 1981, 376 p. (in Russian). Globalnye izmeneniya klimata i prirodnoi sredy pozdnego kainozoya v Sibiri [Global climate and natural environment changes of the late Cenozoic in Siberia]. A.P. Derevyanko (Ed.). Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2008, 511 p. (in Russian).

Grubov L.A., Slavin V.I. Comparative assessment of hydrogeological conditions of various regions of the Yakut artesian basin in relation to oil and gas potential. In: Hydrogeological research in oil and gas bearing areas. Leningrad, VNIGRI, 1971, p. 184–202 (in Russian).

Duchkov A.D., Zhleznyak M.N., Sokolova L.S., Semenov V.P. Methane and carbon dioxide hydrate stability zones in the sedimentary cover of the Vilyui syncline. Earth’s Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 6, p. 16–22.

Zheleznyak M.N., Semenov V.P. Geotemperaturnoe pole i kriolitozona Viluiskoi sineklizy [Geotemperature Field and Cryolithozone of the Vilyui Syncline]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2020, 123 p. (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).

Kotlyakov V.M., Lorus K. Four climate cycles based on ice core data from a deep well at Vostok station in Antarctica. Seriya Geograficheskaya [Proceeding of RAN. Ser. Geogr.], 2000, No. 1, p. 7–19 (in Russian).

Romanovskii N.N. Osnovy kriogeneza litosfery [The Basics of Cryogenesis Lithosphere]. Moscow, Izd-vo MGU, 1993, 336 p. (in Russian).

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

Sivtsev A.I., Rozhin I.I. Validation of the potential of gas accumulations under permafrost-hydrate with a fluid stop. In: Problems of engineering permafrost: Proc. of the IX Intern. Symposium (Mirnyi, 3–7 Sept. 2011). Yakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN, 2011, p. 422–428 (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 Vilyui syncline. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika [Neftegazovaya Geologiya. Theory and Practice], 2017, vol. 12, No. 1, 20 p. (in Russian).

Fotiev S.M. Siberian geocryological chronicles. Kriosfera Zemli [Earth’s Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 3, p. 3–16 (in Russian).

Fotiev S.M. Debatable problems of geocryology: review of achievements. Earth’s Cryosphere, 2020, vol. XXIV, No. 3, p. 3–15.

Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. N.Y., Basel, Hong-Kong, Marcel Dekker, Inc., 1997, 705 p.

*Поступила в редакцию 15 сентября 2020 г.,  
после доработки – 7 января 2021 г.,  
принята к публикации 11 января 2021 г.*