

Современная динамика подводной мерзлоты и эмиссия метана на шельфе морей Восточной Арктики в контексте прошлых и будущих изменений климата.

О.А. Анисимов, И.И. Борзенкова, С.А. Лавров
Государственный гидрологический институт, С.Петербург;
oleg@oa7661.spb.edu

Субаквальная мерзлота, шельф, эмиссия метана, газовые гидраты

Sub-aquatic permafrost, shelf, methane emission, gas hydrates

Рассматривается эмиссия метана в связи с изменениями многолетнемерзлых осадков на шельфе морей Восточной Арктики (МВА) за период с начала затопления 9,000-6,000 лет назад по настоящее время и далее до конца текущего десятилетия. Оценка проводится при помощи физически полной модели гидротермического режима грунтов. Показано, что современная повышенная эмиссия метана на шельфе МВА дает вклад около 0.01 °C в среднегодовую глобальную температуру воздуха. Даже для климатического сценария, завывшающего возможный диапазон увеличения температуры придонных вод, к концу третьего тысячелетия мощность верхнего оттаявшего слоя донных отложений будет порядка 90 м и не достигнет верхней границы зоны распространения гидратов, находящейся на уровне 100-140 м под дном шельфа. Полученные результаты не подтверждают широко обсуждаемую гипотезу о возможности «метановой катастрофы» на шельфе МВА.

Введение

В многочисленных исследованиях было показано, что таяние многолетнемерзлых грунтов, формирование озер в карстовых просадках, береговая эрозия и вынос органического вещества Сибирскими реками на шельф, также как и декомпозиция газовых гидратов в суб-аквальной части криолитозоны, приводят к увеличению эмиссии метана [13, 14, 20, 25, 39, 41]. Неоднократно высказывались опасения, что эти процессы в Арктике могут заметно усилить глобальное потепление, однако количественные оценки до недавнего времени отсутствовали. В нескольких предшествующих работах с этих позиций были рассмотрены многолетнемерзлые болота криолитозоны России [2, 16]. Математическое моделирование с использованием климатических проекций показало, что увеличение эмиссии метана при их таянии на протяжении 21 века может вызвать лишь весьма незначительное увеличение глобальной температуры воздуха порядка 0.01 °C [15]. В ряде других публикаций анализировались данные измерений концентрации метана в воздухе и в воде на шельфе морей Восточной Арктики (МВА, рис. 1) и отмечались

повышенные ее величины по сравнению со среднеширотным значением, в особенности на шельфе моря Лаптевых [12-14, 35, 36]. Была выдвинута заслуживающая внимание гипотеза об усилении транспорта в атмосферу высвобождающегося из шельфовых гидратов метана за счет образования сквозных таликов, в том числе обусловленных современным потеплением, и увеличения газовой проницаемости многолетнемерзлых донных отложений [37]. Эта гипотеза поддерживается не всеми специалистами, многие из которых считают такое объяснение наблюдений малообоснованным. Альтернативная точка зрения состоит в том, что на шельфе МВА на протяжении многих веков, если не тысячелетий, происходил транспорт метана из глубинных слоев донных отложений, интенсивность которого едва ли могла существенно измениться за прошедшее столетие [22]. Увеличение потоков метана в атмосферу, если оно действительно имело место, могло быть связано с усилением биогенного метаногенеза в поверхностном придонном слое осадков, обусловленного увеличением выноса на шельф органического вещества реками и ростом температуры придонных вод. По океанографическим данным, с середины 1980-х годов по настоящее время в летний период придонная температура увеличилась на 2.1 °С.

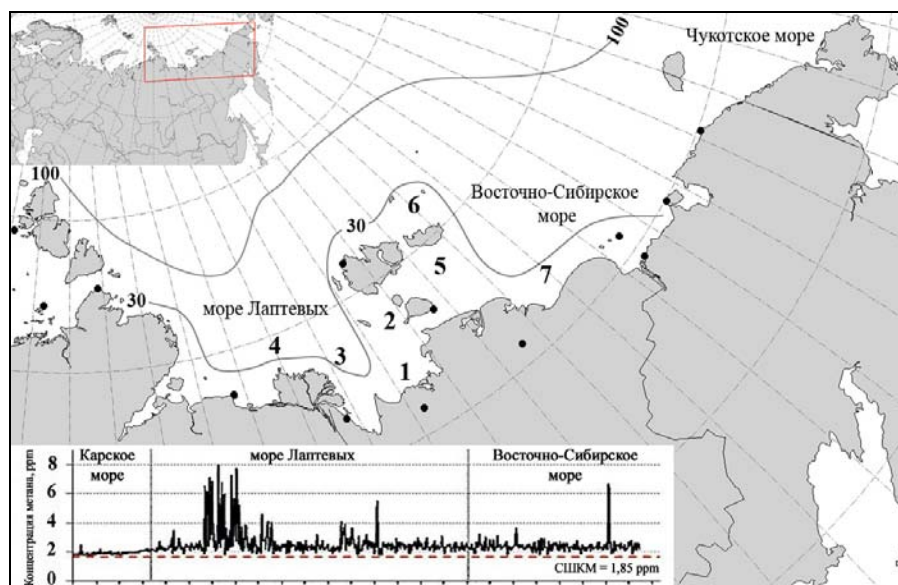


Рис.1. Карта изучаемого региона. Изолиниями показаны внешняя граница шельфа МВА (изобата 100 м) и граница среднего шельфа (изобата 30 м). Номерами обозначены различные районы шельфа, обеспеченные данными гидрографических наблюдений. Точками обозначены метеостанции сети наблюдений Росгидромета. Рисунок на вставке показывает вариации концентрации метана вдоль профиля, пересекающего шельф МВА с запада на восток (воспроизведен рисунок, опубликованный в статье (Shakhova et al., 2010).

Нами две названные гипотезы оцениваются и сравниваются в контексте ретроспективных палеоклиматических реконструкций, данных современных наблюдений и результатов моделирования углеродного цикла и гидротермического режима суб-

аквальных многолетнемерзлых отложений. Ключевым в статье является вопрос о том, в какой степени изменение климата за прошедшие несколько десятилетий могло повлиять на современную повышенную эмиссию метана на шельфе МВА, и каковы перспективы на последующие столетия. Независимо от того, чем она обусловлена, важно установить влияние на современный и будущий климат. Для этого в заключительном разделе статьи проводится расчет изменения концентрации метана в атмосфере за счет источников на шельфе МВА, оцениваются обусловленные этим дополнительное радиационное воздействие и повышение глобальной температуры воздуха.

Отправной точкой нашей работы послужили результаты предшествующих исследований, в которых была изучена история шельфа МВА, построена концептуальная модель и проведены оценочные расчеты его эволюции в ходе регрессионно-трансгрессионных океанических изменений, охватывающих четыре крупных климатических цикла за последние 400 тысяч лет [33, 34]. В них было изучено формирование и перераспределение наземных, шельфовых и океанических гидратов в геологических масштабах времени, описана сложная структура многолетнемерзлых отложений, которые в различные периоды формировались попеременно в субаэральных и субаквальных условиях. Краткий обзор этих исследований дан в публикации [12].

Отличительными чертами нашей работы является использование более полного, чем в предшествующих исследованиях, объема полученных различными авторами данных наблюдений за метаном и гидрографических данных о температуре и солености в районе МВА; применение физически полной динамической модели гидротермического режима многолетнемерзлых донных отложений, учитывающей влияние диффузии соли в слой осадков и вероятностного метода организации модельных расчетов; применение в расчетах транзитивного климатического сценария для района МВА, объединяющего палеорекострукции последних 25,000 лет и схематичные климатические проекции на 21 век и на последующий период. По этому сценарию была рассчитана мощность талого слоя донных отложений, определено положение вертикальных границ зоны устойчивого состояния субаквальных гидратов для прошлых, современных и прогнозируемых на будущее климатических условий и дана оценка влияния эмиссии метана с шельфа МВА на глобальную температуру воздуха. Результаты работы позволили оценить реалистичность «метановой катастрофы», широко обсуждаемой в настоящее время.

Источники метана в суваквальной криолитозоне в условиях меняющегося климата

Источниками метана на шельфе МВА могут служить как резервуары, в которых содержится ранее синтезированный газ (гидраты, находящиеся в донных отложениях и

природные углеводороды), так и органические осадки в придонном слое, где он постоянно образуется в процессе микробиального метаногенеза [12]. Последние можно разделить на осадки, сформировавшиеся в позднем плейстоцене в субаэральных условиях, подвергшиеся сингенетическому промерзанию 18,000-20,000 лет назад и последующему частичному оттаиванию в своем верхнем слое после затопления шельфа около 9,000-6,000 лет назад, и на современные осадки, постоянно пополняемые за счет обломочного материала береговой эрозии и наносов Сибирских рек. Большую часть шельфа МВА подстилают многолетнемерзлые породы, при этом современный метаногенез может происходить лишь в верхнем талом слое осадков.

Субаквальные гидраты могут служить источником метана в случае, если нарушаются условия их стабильного существования, определяемые следующим уравнением, связывающим температуру и давление [38]:

$$T_D(p) = T_{D0} + T_{D1} \ln(p/p_{D0}) \quad (1)$$

В уравнении (1) T_D - значение температуры ($^{\circ}\text{C}$), выше которого при данном давлении p (атм) начинается диссоциация гидратов. Константы уравнения имеют следующие значения: $T_{D0} = 283^{\circ}\text{C}$, $T_{D1} = 10^{\circ}\text{C}$, $p_{D0} = 50.3$ атм

На рисунке 2 показана фазовая диаграмма устойчивости гидратов в зависимости от температуры и давления. В области ниже изображенной кривой гидраты находятся в устойчивом состоянии, при переходе в верхнюю область происходит их диссоциация. При незначительных близких к нулю отрицательных температурах донных осадков для устойчивости гидратов необходимо давление более 15 атмосфер, которое достигается на глубине ниже 150 метров от уровня моря. Гидраты метана имеют плотность 0.913 и всплывают в воде, поэтому в устойчивом состоянии они могут находиться лишь на некоторой глубине в слое осадков ниже дна. Так, на шельфе глубиной 30-50 метров, верхняя граница зоны устойчивого состояния гидратов $Z_{ГВ}$ располагается в слое осадков ниже 120-100 метров от дна. При увеличении придонной температуры эта граница опускается, и в слое между ее первоначальным и текущим уровнем происходит разложение гидратов (если они там имеются) с выделением метана. Положение нижней границы зоны устойчивого состояния гидратов $Z_{ГН}$ можно определить также исходя из уравнения (1) или кривой на рисунке 2, зная изменения температуры и давления с

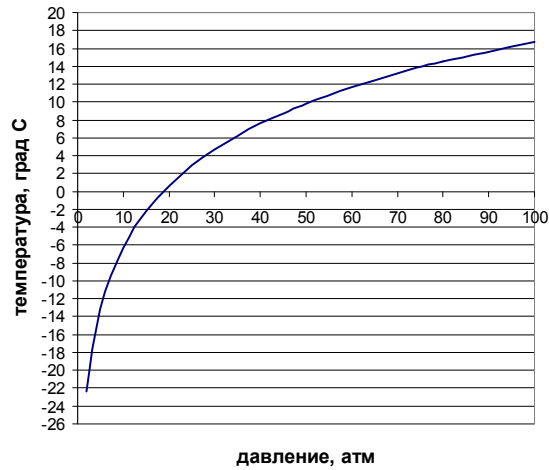


Рис.2. Фазовая диаграмма устойчивости гидратов в пространстве температуры и давления. глубиной. Наиболее часто используют гидростатическое приближение в отношении давления и равновесный профиль температуры, при этом обе величины линейно растут с глубиной,

$$T = T_0 + k Z, \quad p = p_0 + \rho g Z. \quad (2)$$

В уравнениях (2) T_0 и p_0 – температура и давление на верхней границе среды (на уровне дна), k – температурный градиент, ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, Z – глубина, отсчитываемая от верхней границы. Подставив (2) в (1), получим уравнение относительно Z ,

$$T_0 + k Z = T_{до} + T_{дл} \ln((p_0 + \rho g Z) / p_{до}) \quad (3)$$

В общем случае это уравнение имеет два решения, Z_1 и Z_2 , которые соответствуют глубинам расположения нижней и верхней границ зоны устойчивого состояния гидратов. Отметим, что в контексте рассматриваемых в статье задач перемещениями нижней границы $Z_{ГН}$ можно пренебречь, поскольку на шельфе МВА она находится на глубинах нескольких сотен метров, где климатические колебания векового масштаба практически не ощущаются, и изменения ее положения относительно малы.

Впервые динамика положения вертикальных границ зоны устойчивого состояния гидратов на шельфе МВА за последние 160,000 лет была оценена при помощи геологической модели в работе [34]. Было показано, что, начиная с гляциального максимума позднего плейстоцена 20 тыс. лет назад по настоящее время, $Z_{ГН}$ находилась на глубине около 1150 м, практически не меняя своего положения, а $Z_{ГВ}$ опускалась от

начальной глубины 150 м до 200 м вследствие потепления климатического оптимума голоцена.

В недавней публикации [6] приводятся оценки возможных изменений $Z_{ГВ}$ субаквальных гидратов для всего северного полушария в 21 веке. Они были получены с использованием модели тепло- и влагопереноса ИФА РАН [3], в которой температура придонной воды рассчитывается для сценария эмиссии парниковых газов А2 по климатическим моделям ИВМ РАН и GFDL. В первом случае расчеты указывают на то, что на шельфе МВА верхняя граница зоны устойчивого состояния гидратов может опуститься за 100 лет на несколько метров (не более, чем на 10м). При использовании проекции GFDL ее положение практически не изменяется [6].

В настоящее время наблюдается увеличенное относительно среднеширотного значения содержание метана в приземном воздухе над шельфом МВА, причины которого не выяснены [37]. Важно установить, может ли это быть вызвано современным потеплением последних десятилетий, или тому есть иные причины. По гидрографическим данным, с 1984 по 2009 год в летний период температура придонных вод значительно выросла на всем шельфе МВА. Это было особенно выражено в мелководной (<10 м) части шельфа моря Лаптевых, где она увеличилась приблизительно на 2.1 °С, устойчиво перейдя в область положительных температур порядка 1.5 °С, и в 2007 г. достигла абсолютного максимума за период наблюдений с 1920 г., равного 5.9 °С [22]. Этот рост температуры, притом, что в зимний период она оставалась слабо отрицательной (от -1.4 °С до -1.6 °С), несомненно, привел к изменению термического режима в слое донных осадков и мог вызвать их частичное оттаивание. Гипотетически это могло привести к дестабилизации гидратов. Для получения количественных оценок нами были проведены расчеты по динамической модели гидротермического режима донных осадков. В расчетах использовался транзитивный климатический сценарий, объединяющий палеоданные за предшествующие 25,000 лет и схематичную климатическую проекцию на следующее тысячелетие.

Оценка современных данных в палео ретроспективе

При обсуждении возможности «метановой катастрофы» представляется важным сопоставить данные о температуре воздуха и содержании метана в атмосфере в различные периоды времени. Первые количественные оценки содержания метана в атмосфере, полученные в результате анализа пузырьков воздуха из покровных ледников Гренландии и Антарктиды, показали, что во время гляциальных периодов она была практически вдвое меньше (300 – 320 миллиардных объемных долей, ppbv), по сравнению межледниковыми периодами и составляло 750-800 ppbv. В настоящее время концентрация метана в

атмосфере составляет 1750 – 1800 ppbv. Совместный анализ данных об изменении температуры воздуха в высоких широтах и концентрации метана в атмосфере за последние 16,000 лет показал, что временной сдвиг между ними составляет несколько десятков лет и изменение температуры следует за изменением концентрации метана [18]. Таяние вечной мерзлоты и усиление процессов болотообразования во время межледниковий и межстадиалов плейстоцена сопровождались значительными эмиссиями метана, что могло играть определяющую роль в изменении климата в прошлом. По-видимому, вклад северного полушария в планетарный баланс метана, как в настоящее время, так и в прошлом был больше, чем южного из-за большей площади подземного оледенения. Существует сравнительно небольшой меридиональный градиент метана между полушариями, над Арктикой и Гренландией его содержится больше на 8-10%, чем над Антарктидой. Предполагают, что такой градиент мог иметь место и в прошлом, увеличиваясь во время межледниковий и межстадиалов, когда в высоких широтах северного полушария происходило интенсивное таяние многолетнемерзлых грунтов, а в субтропических широтах за счет усиления муссонной циркуляции увеличивалась площадь увлажненных и заболоченных территорий. Определенную роль в увеличении концентрации CH₄ во время потеплений могли играть различные типы подледниковых озер и таликов [11, 18, 19, 23, 26, 27].

Наибольшие значения концентрации метана в атмосфере отмечались в начале процесса дегляциации, когда уровень моря быстро поднимался, затопивая участки суши и превращая их в морской шельф. Такие процессы могли развиваться в районах северного полушария, свободных от покровных ледников, преимущественно на севере Западной и Восточной Сибири. Между 10,000 и 6,000 отмечается отрицательный тренд концентрации метана, который в дальнейшем сменился ростом. Причины таких колебаний пока неясны. Можно предположить, что высокие значения концентрации метана около 10,000 лет назад были обусловлены высокими значениями температуры воздуха в высоких широтах в районах свободных от оледенения, на севере и северо-востоке Азии. В это время там отмечались самые высокие значения летних температур вследствие увеличения прихода летней солнечной радиации примерно на 10% выше современных для всего северного полушария [17, 40]. На севере Азии (приморские низменности Якутии и северо-восток) летние температуры воздуха около 10,000 - 9,000 лет назад могли достигать 10°C и выше, о чем свидетельствуют находки остатков древесной растительности даже на островах Арктического бассейна (Б.Ляховский и Котельный) [1, 7, 9].

Более низкая, чем в начале голоцена, концентрация метана около 6,000 лет назад могла быть обусловлена тем, что процесс дегляциации к этому времени практически

завершился, уровень океана около 6,200 лет назад достиг максимума, границы шельфа на северо-востоке и севере Азии были близки к современным [28]. Новый этап повышения концентрации метана имел место около 5,500 лет назад и был связан с увеличением площади переувлажненных территорий как в низких широтах (сокращение площади субтропических и тропических пустынь, «зеленая» Сахара), так и в высоких широтах северного полушария (большое количество послеледниковых озер и водных бассейнов, начало процессов торфообразования, таяние вечной мерзлоты и др. процессы) [4, 5]. Положительный тренд концентрации метана и других парниковых газов продолжался на протяжении последних 5,000 лет. С середины 19 столетия началось его резкое увеличение, которое было вызвано влиянием человека [29].

Температуры воздуха в прибрежных районах на севере Азии во время климатического оптимума между 7,000 – 5,500 лет назад с средним за год были на 3,0 - 3,5 °С выше современных [4, 24]. Июльские температуры могли составлять около 6 °С, январские – около -32 °С. Средние годовые температуры воздуха в середине голоцена были порядка -13 °С. Примерно до 4,500 лет назад температуры изменялись незначительно, а затем начали медленно уменьшаться. Интересно отметить, что концентрации парниковых газов при этом не уменьшались, а продолжали увеличиваться, хотя небольшие колебания и имели место [23, 29].

В таблице 1 представлены наиболее вероятная (T_{CP}), нижняя (T_{MIN}) и верхняя (T_{MAX}) оценки среднегодовой температуры воздуха на севере Азии для различных климатических периодов, временные границы которых совпадают с изменениями знака тренда температуры северного полушария. На основе этих данных была построена часть транзитивного климатического сценария для модельных расчетов, охватывающая период от 25,000 лет назад до времени затопления шельфа МВА 9,000-6,000 лет назад. Можно предположить, что между минимальными температурами около 18,000 лет назад и максимальными около 9,000 лет назад, температуры увеличивались почти линейно, затем между 9,000 и 6,000 лет назад изменения были незначительные, с температурами несколько меньше, чем во время максимума потепления 9,000 лет назад. Понижение температуры началось после 4,500 лет назад и далее температуры линейно уменьшались до современных значений.

Таблица 1. Среднегодовая температура воздуха в районе шельфа МВА в различные периоды.

Время, тыс.лет т.н.	T_{CP} , °С	T_{MIN} , °С	T_{MAX} , °С
---------------------	---------------	----------------	----------------

25 -20	-20	-23	-18
20 -18	-23	-26	-20
10 -9	-10	-12	-8
9 -6	-13	-15	-11
0	-15	-14	-16

Ретроспективное и прогностическое моделирование динамики субаквальной мерзлоты и эмиссии метана

Для расчета динамики гидротермического состояния толщи осадков на шельфе МВА была применена физически полная модель, описание которой дано в [8]. Главным отличием от аналогичных моделей, использованных ранее другими авторами, является математическое описание диффузии соли и ее влияния на температуру и фазовое состояние осадков. В остальном структура модели и математический формализм близки описанным в публикации [30]. Для сопоставимости с результатами предшествующих работ [21, 30] были использованы принятые в них базовые значения характеристик донных осадков, а именно, коэффициент теплопроводности $\lambda=2.2$ Вт м⁻¹ °С⁻¹, объемная теплоемкость $c = 1.2 \times 10^6$ Дж м⁻³ °С⁻¹, пористость $\eta = 0.2$. Основными расчетными характеристиками являются вертикальный профиль температуры $T(z)$; глубина от уровня дна до верхней и нижней границ слоя многолетнемерзлых осадков $Z_{MB}(t)$, $Z_{MH}(t)$ и до границ зоны устойчивого состояния гидратов $Z_{GB}(t)$, $Z_{GH}(t)$ в различные моменты времени t .

Были проведены транзитивные расчеты от начального момента времени 25,000 лет назад ($t_0 = -25000$), предшествующего затоплению шельфа в момент времени $t_3 = -9000 \div -6000$, до настоящего времени и далее до конца второго тысячелетия. В базовом климатическом сценарии предполагалось, что во время затопления t_3 среднегодовая температура шельфа увеличилась на 11.5 °С, с -13 °С, когда он был обнажен и имел температуру, близкую температуре воздуха, до -1.5 °С (температура придонной воды), после чего она оставалась постоянной до 1985 г. Далее до 2100 г. задавался рост температуры придонной воды со скоростью 0.09°С/год, равной тренду, наблюдаемому в период 1985-2009 г., после чего температура фиксировалась и расчет продолжался до 3000 года. Учитывалась также диффузия соли в донные осадки и ее отепляющий эффект, при этом соленость придонной воды задавалась равной 20.9 psu летом и 26.6 psu зимой, в соответствии с данными измерений [22].

Расчеты с такими установками иллюстрируют рисунки 3 и 4. На рис. 3 показаны

изменения во времени температуры донных отложений (у поверхности дна и на глубинах 200 м и 1000 м под ней) и положения границ мерзлоты и зоны устойчивого состояния гидратов. На рисунке 4 показаны вертикальные профили температуры для нескольких временных срезов.

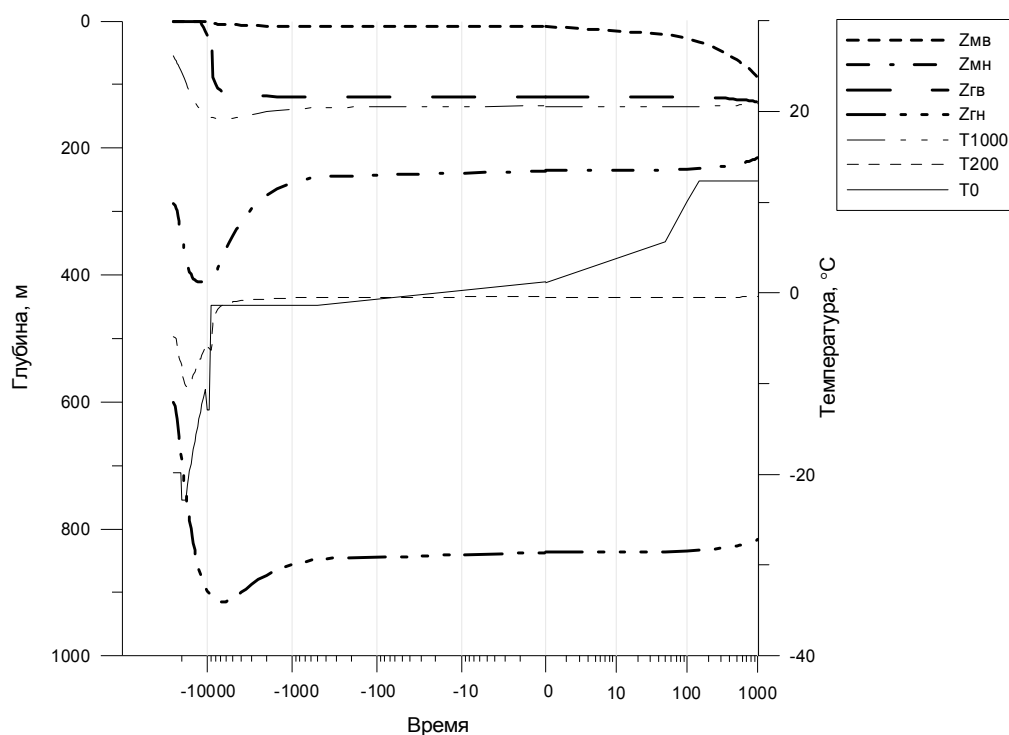


Рис. 3. Изменения во времени температуры донных отложений (у поверхности дна и на глубинах 200 м и 1000 м под ней) и положения границ мерзлоты и зоны устойчивого состояния гидратов.

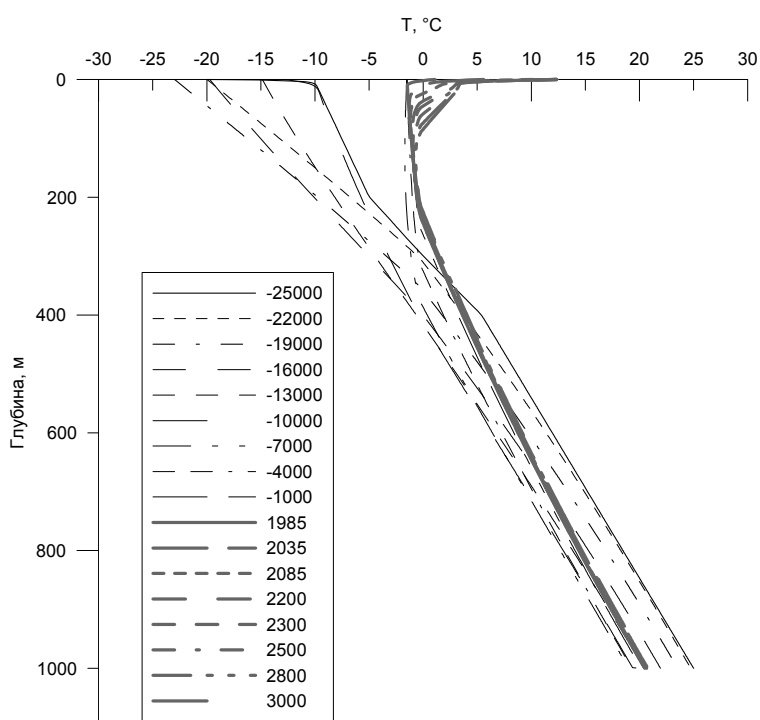


Рис. 4. Вертикальные профили температуры донных осадков для различных временных срезов.

Результаты показали, что за период с начала затопления 9,000 – 6,000 лет назад и до середины 1980-х годов донные осадки оттаяли чуть менее чем на 10 метров притом, что среднегодовая температура придонных вод оставалась слабо отрицательной. Это было обусловлено диффузией соли в поровом пространстве, в результате которой лед был трансформирован в незамерзающий солевой раствор и слой стал проницаемым для газов. Исходя из результатов расчёта, говорить о точном расположении фронта таяния затруднительно, поскольку он размазан на несколько метров. Существует прослойка засоленных мёрзлых грунтов с различными степенями льдистости и солёности. Мы считали талым отрицательнотемпературный слой с солёностью порового раствора не менее 0.02 psu.

За прошедшие после начала потепления 25 лет температура придонных вод увеличилась в летний период примерно на 2.1 °С, в результате чего донные отложения могли оттаять еще на 6-8 м, углубившись на 16-18 м от поверхности дна. Очевидно, этот результат не подтверждает высказанную в [37] гипотезу об обусловленности высокой эмиссии метана увеличением газовой проницаемости слоя донных осадков за счет появления в последние десятилетия зон сквозного протаивания (таликов). В последующем к 2050, 2100 и 3000 году расчеты с заданными установками указывают, что верхняя граница многолетнемерзлых осадков Z_{MB} может переместиться на глубину около 20м, 28м и 90м от уровня дна, соответственно. Положение нижней границы за период 1985 по 3000 г. изменилось незначительно, она поднялась всего на 20 метров, с 235 до 215 м. При этом расчёты показывают, что на глубине ниже 150 м температура за этот период практически не изменилась. Таким образом, даже при экстремальном и крайне нереалистичном климатическом сценарии, максимально благоприятствующем ускоренному оттаиванию осадков, в текущем тысячелетии оно не сможет достичь современного уровня верхней границы зоны устойчивого состояния гидратов.

Из расчётов видно, что в настоящее время доминирующим фактором, определяющим скорость оттаивания, является температурный тренд, поскольку фронт оттаивания опережает фронт распространения солей. Выполнив также расчёты без учёта температурного тренда, мы получили глубину оттаивания за счет диффузии соли на 3000 год всего около 13 м, в то время как с температурным трендом она составила почти 90 м.

Модельные расчеты находятся в прямой зависимости от точности реконструкции предыдущей и проекции будущей температуры на поверхности донных отложений $T(t)$, от точности задания физических характеристик грунта (λ , c , η ,) и геотермального потока тепла. Для оценки влияния неопределенности этих величин на решение была использована методология вероятностного моделирования, в соответствии с которой

проводились серии многократных идентичных расчетов от различных граничных и начальных условий с варьируемыми значениями модельных параметров. Исследовалась зависимость решения от начальной мощности многолетнемерзлой толщи $Z_{MH}(t_0)$, которая задавалась меняющейся от 100 до 500 м с шагом 100 м; временного хода температуры поверхности $T(t)$ в период от 25,000 до 9,000-6,000 лет назад, предшествующий затоплению (помимо базового климатического сценария, показанного сплошной линией на рисунке 3, проводились расчеты для отличающегося от него в каждый момент времени на ± 3 °C); времени начала затопления шельфа t_3 (менялось в расчетах от 9,000 до 6,000 лет назад с шагом 1 тысяча лет); температуры придонных вод $T(t_3)$ в период после затопления и до 1985 г. (задавалась отличающейся на ± 1 °C от базового значения -1.5 °C); геотермального потока тепла F_g (задавались два значения 0.035 и 0.07 Вт м⁻²); тренда увеличения летней температуры придонных вод после 1985 г., ΔT (задавался равным 0.09 и 0.18 °C/год, что заведомо многократно превышает даже наибольшие из проектируемых гидродинамическими моделями климатических изменений в 21 веке). Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные значения положения границ многолетнемерзлых осадков и устойчивого состояния гидратов в зависимости от изменчивости характеристик температурного режима и физических свойств грунта.

Параметры	$Z_{MH}(t_0)$, м	$T(t)$, $t < t_3$	t_3 , т.л. назад	$T(t_3)$, °С	ΔT , °С/год	F_g , мВт/м ²	λ , Вт/(м °С)	η ,
Диапазон	100-500	$T_{cp} \pm 3^{\circ}C$	9 – 6	-1.5±1	0,09-0,18	35-70	1.7-2.2	0,2 -0,25
Изменчивость выходных параметров								
$Z_{MB}(1985)$, м	9	9	9	8-9	9	9	9	8-9
$Z_{MH}(1985)$, м	236	199-273	236-297	216-255	236	236-414	197-236	236-260
$Z_{MB}(2100)$, м	31	31	31	31-35	31-38	31	31	30-31
$Z_{MH}(2100)$, м	233	196-270	233-294	215-253	233	233-412	195-233	233-258
$Z_{MB}(3000)$, м	90	88-91	86-90	84-100	90-130	86-90	80-90	79-90
$Z_{MH}(3000)$, м	216	180-253	216-276	192-239	216	216-402	179-216	216-244
$Z_{GB}(t_3)$ м	129	126-152	109-138	129	129	125-129	129	129-130
$Z_{GB}(1985)$, м	142	140-169	120-159	110-159	142	136-142	142-145	142-144
$Z_{GB}(2100)$, м	142	140-169	120-160	112-160	142	136-142	142-145	142-144
$Z_{GB}(3000)$, м	147	146-173	127-164	126-164	147-150	143-147	147-149	147-151

Обсуждение результатов

Проведенный анализ и результаты расчетов показали, что наблюдаемая повышенная концентрация метана в воздухе над шельфом МВА не связана с диссоциацией гидратов, равно как и с увеличением мощности талого слоя донных отложений. Главный вывод, который можно сделать, заключается в том, что при всех рассмотренных нами температурных режимах не только на протяжении 21 века, но с большой вероятностью и до конца текущего тысячелетия верхняя граница мерзлоты будет находиться выше зоны устойчивого состояния гидратов метана. Даже для нереалистичного климатического сценария, завышающего возможный диапазон увеличения температуры придонных вод, к концу третьего тысячелетия мощность верхнего оттаявшего слоя донных отложений будет порядка 90 м. Верхняя же граница зоны распространения гидратов по нашим и другим имеющимся оценкам на шельфе при глубине моря 10 – 50 м находится на уровне 140-100 м под поверхностью дна. Таким образом, эта зона будет изолирована слоем многолетнемерзлых отложений, газовая проницаемость которого близка к нулю.

Оценивая влияние неопределенности влияющих модельных параметров следует принимать во внимание, что, согласно проведенным расчетам, динамика оттаивания мерзлоты более чувствительна к будущим изменениям температуры, чем к точности реконструкции температурного режима в прошлом. Заметное влияние на модельные расчёты оказывают физические свойства грунта. Влияние засоленности морской воды на состояние мерзлоты проявляется в том, что после затопления суши и вплоть до 1985 года верхняя граница мерзлоты опустилась примерно на 9 м, притом, что температура на поверхности дна оставалась отрицательной. Это оттаивание обусловлено не термическим воздействием, а диффузией соли, за счет которого многолетнемерзлые осадки трансформируются в отложения, содержащие переохлажденный солевой раствор в поровом пространстве.

Наибольший интерес представляет вопрос о том, как влияет современная повышенная эмиссия метана на шельфе МВА на глобальное потепление. Прежде всего, для этого нужно определить, какой вклад в глобальную атмосферную концентрацию метана дает этот поток, оцениваемый авторами [37] в 7.9 Тг С в год. Рассчитать его можно, приняв во внимание, что среднее время жизни молекулы метана в атмосфере составляет около 12 лет [31]. Таким образом, в равновесном состоянии этот источник увеличит концентрацию метана в атмосфере приблизительно на 95-100 Тг, или же на 40 ppbv. При том, что чувствительность глобально осредненной среднегодовой температуры

воздуха к увеличению атмосферного содержания метана на 1000 ppbv составляет около 0.3 °С [10, 32], с эмиссией метана на шельфе МВА связано повышение температуры примерно на 0.01 °С. Это не дает оснований говорить о возможности сколько-нибудь заметного влияния на глобальный климат. Даже при десятикратном увеличении современной повышенной эмиссии на шельфе МВА обусловленное этим увеличение глобальной температуры воздуха не превысит 0.1 °С, что заметно ниже неопределенности климатических проекций, связанной с недостаточной изученностью других климатообразующих факторов.

Полученные результаты не поддерживают гипотезу о возможной «климатической катастрофе» в связи с эмиссией метана из осадков шельфа МВА. Помимо представленных в статье результатов, эту гипотезу опровергают также и палеоклиматические данные. После гляциального максимума позднего плейстоцена уже был более теплый, чем в настоящее время, продолжительный период в оптимум голоцена, и никакие сведения не подтверждают наличие изменений, которые можно было бы назвать катастрофическими притом, что процессы на шельфе должны были быть во многом идентичны современным.

Благодарности

Авторы выражают признательность Ю.Г. Стрельченко за подготовку рисунков к рукописи. Данная работа поддерживается РФФИ, проект 11-05-12011-офи-м-2011.

Литература

1. Андреев А.А., Климанов В.А. Растительность и климат низовьев Яны в голоцене. // *Известия РАН. Серия географическая*, 2000, №1, с. 88-93.
2. Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А. Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата // *Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем*, Израэль Ю.А. (ред.). С.Петербург: Гидрометеиздат, 2005, с. 124-142.
3. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И., Хон В. Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов Сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008, Т. 44, № 1, с. 86-93.
4. Борзенкова И.И. Изменение климата в кайнозое. 1992, Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 247 с.
5. Величко А.А. (ред.). Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарий. 2010, М.: ГЕОС. 219 с.
6. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Оценка отклика субаквальных залежей метангидратов на возможные изменения климата в XXI веке // *Доклады Академии Наук*, 2011, т. 441, № 5, с. 1-4.
7. Каплина Т.Н., Чеховский А.А. Реконструкция палеогеографических условий голоценового климатического оптимума на приморских низменностях Якутии. // *Четвертичный период на Северо-востоке Азии*. Магадан, 1987, с. 145-151.
8. Лавров С.А., Анисимов О.А. Моделирование гидротермического режима грунтов:

- описание физически полной динамической модели и сравнение расчетов с наблюдениями // *Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем*, Израэль Ю.А. (ред.), 2011, М.: "Планета", с. 22-41.
9. Лаухин С.А. Эволюция природной зональности на северо-востоке Азии в плейстоцене // *Доклады Академии Наук*, 1994, т. 338, с. 683-686.
 10. Семенов С.М., Попов И.О. Сравнительные оценки влияния изменения концентраций диоксида углерода, метана, закиси озота и водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности // *Метеорология и гидрология*, 2011, № 8, с. 34-43.
 11. Семилетов И.П. Глобальное потепление и цикл углерода в Арктике. // *Вестник ДВО РАН*, 1997, №4, с. 75-85.
 12. Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Сергиенко В.И., Салюк А.Н., Бельчева Н.Н., Космач Д.А. Состояние вопроса о роли Восточно-Сибирского шельфа в современном цикле метана // *Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы*, Котляков В.М. (ред.). М.: Пробел 2000, 2008, 164-176 с.
 13. Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // *Вестник РАН*, 2009, т. 79, № 6, с. 507-518.
 14. Шахова Н.Е., Юсупов В.А., Салюк А.Н., Космач Д.А., Семилетов И.П. Антропогенный фактор и эмиссия метана на Восточно-Сибирском шельфе // *Доклады Академии Наук*, 2009, т. 429, № 3, с. 398-401.
 15. Anisimov O. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // *Environmental Research Letters*, 2007, № 2, doi:10.1088/1748-9326/2/4/045016.
 16. Anisimov O.A., Reneva S.A. Permafrost and changing climate: the Russian perspective // *Ambio*, 2006, V. 35, № 4, p. 169-175.
 17. Bradley R.S. Climate forcing during the Holocene // *Global changes in the Holocene approaches to reconstructing fine-resolution climate change.*, Mackay A.W., Battarbee, R.W., Birks, H.J.B. and Oldfield, F., (Eds.) London: Arnold, 2003 p.
 18. Brook E.L., Harder S., Severinghaus J., Steig E.J., Sucher C.M. On the origin and timing of rapid changes in atmospheric methane during the last glacial period // *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, V. 15, p. 559-572.
 19. Chappellaz J., Blunier T., Kints S., Dallenbach A., Barnola J.-M., Schwander J., Raynaud D., Stauffer B. Changes in the atmospheric CH₄ gradient between Greenland and Antarctica during the Holocene. // *Journal of Geophysical Research*, 1997, V. 102 (D13), p. 15987-15999.
 20. Christensen T.R., Johansson T.R., Akerman H.J., Mastepanov M., Malmer N., Friborg T., Crill P., Svensson B.H. Thawing sub-arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions // *Geophysical Research Letters*, 2004, V. 31, L04501, doi:10.1029/2003GL018680.
 21. Delisle G. Temporal variability of subsea permafrost and gas hydrate occurrences as function of climate change in the Laptev Sea, Siberia // *Polarforschung*, 2000, V. 68, p. 221-225.
 22. Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay B., Kassens H., Anisimov O.A., Lavrov S.A., Razumov S.O., Grigoriev M.N. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability. // *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2011JC007218, 2011, V. 116, C10027,
 23. Fluckiger J., Monnin E., Stauffer B., Schwander J., Stocker T.F., Chappellaz J., Raynaud D., Barnola J.-M. High-resolution Holocene N₂O ice core record and its relationship with CH₄ and CO₂ // *Global Biogeochem. Cycles*, 2002, V. 16, № 1, p. 1010-1016.
 24. Frenzel B., Pecsli M., Velichko A.A., eds. Atlas of paleoclimates and paleoenvironments of the Northern Hemisphere, Late Pleistocene - Holocene. 1992, Stuttgart: Gustav Fisher Verlag. 153 p.
 25. Friborg T., Soegaard H., Christensen T.R., Lloyd C.R., Panikov N.S. Siberian Wetlands: Where a sink is a source // *Geophysical Research Letters*, 2003, V. 30, № 21, p. 2129.
 26. Joos F., Spahni R. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the

- last 20,000 years // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2008, V. 105, p. 1425-1430.
27. MacDonald G.M., Beilman D.W., Kremenetski C.V., Sheng Y., Smith L.C., Velichko A.A. Rapid early development of circumarctic peatlands and atmospheric CH₄ and CO₂ variations // *Science*, 2006, V. 314, p. 285-288.
 28. Mix A.C., Bard E., Schneider R. Environmental processes of the Ice Age: Land, ocean, glaciers (EPILOG) // *Quatern. Sci. Reviews*, 2001, V. 20, p. 627-657.
 29. Monnin E., Steig E.J., Siegentaler U., Kawamura K., Schwander J., Stauffer B., Stocker T.F., Morse D.L., Barnola J.-M., Bellier B. Evidence for substantial accumulation rate variability in Antarctica during the Holocene, through synchronization of CO₂ in the Taylor Dome, Dome C and DML ice cores // *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, V. 224, № 1/2, p. 45-54.
 30. Nikolsky D., Shakhova N. Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: the Dmitry Laptev Strait // *Environmental Research Letters*, 2010, V. 5, p. 1-9.
 31. Prather M., Ehhalt D. Atmospheric chemistry and greenhouse gases // *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.T. Houghton Y.D., D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson., Editor. Cambridge: Cambridge University Press, 2001, p. 239-387.
 32. Ramaswamy V. Radiative Forcing of Climate Change // *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.T. Houghton Y.D., D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson., Editor. Cambridge: Cambridge University Press, 2001, p. 349-416.
 33. Romanovskii N.N., Hubberten H.W. Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea region, Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, V. 12, № 2, p. 191-202.
 34. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrilov A.V., Eliseeva A.A., Tipenko G.S. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // *Geo-mar. Letters*, 2005, V. 25, p. 167-182.
 35. Shakhova N., Semiletov I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf // *Journal of Marine Systems*, 2007, V. 66, № 1-4, p. 227-243.
 36. Shakhova N., Semiletov I., Panteleev G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle // *Geophysical Research Letters*, 2005, V. 32, № 9, p.27-35.
 37. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*, 2010, № 327, p. 1246-1250.
 38. Tishchenko P., Hensen C., Wallmann K., Wong C.S. Calculation of the stability and solubility of methane hydrate in seawater // *Chemical Geology*, 2005, V. 219, p. 37-52.
 39. Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P., Verbyla D., Chapin I., F. S. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. // *Nature*, 2006, V. 443, № 7107, p. 71-75.
 40. Weber S.L., Crowley Y.J., Van der Schrier G. Solar irradiance forcing of centennial climate variability during the Holocene // *Climate Dynamics*, 2004, V. 22, p. 539-553.
 41. Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G., Zimov S.A., Chapin I., F. S. Thermokarst Lakes as a Source of Atmospheric CH₄ During the Last Deglaciation. // *Science*, 2007, V. 318, № 5850, p. 633-636.

Summary

We study the methane emission over the East Siberian Arctic Shelf (ESAS) under the changing sub-aquatic permafrost conditions from the time of inundation 9,000-6,000 years b.p.

to present and further until the end of the millennium. The study is based on the full-physics model of hydrothermal regime of soil. Our results indicate that the current elevated methane emission from ESAS is responsible for 0.01 °C global air temperature rise. Even under the hypothetical climate scenario that overestimates the range of near-bottom water temperature rise, projected by the end of the millennium thawing of the bottom sediments is likely to be about 90 m and will thus not reach the upper limit of the methane hydrate stability zone that is located 100-140 m underneath the sea bottom. The results of the study do not support the so called “methane bomb” hypothesis that is widely discussed in the scientific literature and in the media.