

ПОДЗЕМНЫЕ ЛЬДЫ И НАЛЕДИ

УДК 551.510

Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики

© 2014 г. О.А. Анисимов¹, Ю.Г. Забойкина¹, В.А. Кокорев¹, Л.Н. Юрганов²¹Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург; ²Университет штата Мэриленд в Балтиморе, США
oleg@oa7661.spb.edu

Possible causes of methane release from the East Arctic seas shelf

O.A. Anisimov¹, Yu.G. Zaboikina¹, V.A. Kokorev¹, L.N. Yurganov²¹State Hydrological Institute, Sankt-Petersburg; ²State Maryland University, Baltimore, USA

Статья принята к печати 28 февраля 2014 г.

*Газовые гидраты, субаквальная мерзлота, шельф, эмиссия метана.
Gas hydrates, methane emission, shelf, sub-aquatic permafrost.*

Анализируются данные различных измерений (морских экспедиционных, стационарных на станции Тикси, спутниковых) концентраций метана в воде и в нижней атмосфере на шельфе морей Восточной Арктики. Рассматриваются возможные причины повышенных по сравнению со среднеширотными значениями концентраций метана, установленных на некоторых участках шельфа этих морей. Сравниваются две альтернативные гипотезы этого: современные изменения субаквальной мерзлоты и геологические причины (тектоника, наличие разломов и русел палеорек на рассматриваемой территории). Показано, что концентрации метана в морской воде зависят от расстояния до ближайшего разлома или палеоруслу, где отсутствуют мёрзлые донные отложения и имеются пути для выхода метана из глубоких гидратосодержащих слоёв. Таким образом, на отдельных участках шельфа повышенная эмиссия метана не связана с современным изменением климата. Выполненные ранее модельные расчёты показали, что на шельфе не происходит интенсивного образования сквозных таликов и иных процессов, увеличивающих газовую проницаемость донных отложений. Эти результаты опровергают гипотезу о возможности в обозримом будущем «метановой катастрофы» на шельфе морей Восточной Арктики.

Data on methane concentration in the water and lower atmosphere over the shelf of the East Siberian Arctic Seas, which were obtained using marine, terrestrial, and satellite observations, are analyzed in the paper. This study is targeted towards attribution of the enhanced concentrations of methane above the latitudinal-mean, which have been detected at selected locations of these seas. Our results reject the hypothesis of methane catastrophe on the East Siberian Arctic Seas shelf over the foreseeable future.

Введение

Продолжает развиваться дискуссия о том, какое воздействие может оказать эмиссия углерода из континентальных и субаквальных многолетнемёрзлых грунтов на глобальный климат. Один из поводов для дискуссии – содержание в арктических почвах углерода примерно вдвое больше, чем в атмосфере, и в три с лишним раза больше по сравнению с его содержанием в биомассе всех лесов на планете. Эти оценки основаны на анализе проб типичных арктических почв с последующим пространственным обобщением данных на основе ландшафтных и почвенных карт. Отметим, что с ростом числа анализируемых проб в последние два десятилетия и точности пространственного обобщения суммарные запасы почвенного углерода в Арктике лишь увеличивались. Так, одна из первых оценок в работе [30] составила 455 Пг (1 петаграмм, Пг, = 10^{15} г); через 15 лет она возросла почти вдвое – до 750 Пг, [35], а с появлением новых данных составила 1850 Пг [25, 27, 41].

Современные климатообусловленные изменения многолетнемёрзлых грунтов сопровождаются

увеличением мощности сезонно-талого слоя, в результате часть ранее законсервированного в нём углерода становится доступной и может вступать в углеродный цикл, попадая в атмосферу либо в форме углекислого газа, либо в форме метана. Последнее происходит, когда органический углерод преобразуется в анаэробных условиях (т.е. при отсутствии кислорода, необходимого для синтеза углекислого газа), характерных для переувлажнённых участков торфяников, термокарстовых озёр и мелководных участков шельфа Арктических морей, где за счёт органических осадков, выносимых сибирскими реками, а также береговой эрозии постоянно формируется субстрат для биогенной продукции метана. Усиление эмиссии метана вызывает опасения, так как его радиационное воздействие на климат значительно больше, чем углекислого газа.

В предшествующих публикациях мы показали, что при оттаивании торфяников к середине XXI в. ежегодное поступление метана в атмосферу может увеличиться на 6–8 Тг (1 тераграмм, Тг, = 10^{12} г). Это заметно не повлияет на климат, поскольку обусловленный данным процессом рост глобаль-

но осреднённой температуры воздуха составит не более 0,01 °С [4, 17]. Климатообразующая роль современных процессов на шельфе морей Восточной Арктики (это моря Лаптевых и Восточно-Сибирское) изучена меньше. Ей в публикациях последних лет уделяется наибольшее внимание, поскольку этот шельф представляет собой самую широкую (простирается на 400–800 км от береговой линии) и мелководную (средняя глубина 20–30 м) шельфовую зону Мирового океана [22].

Наряду с современным метаногенезом большой вклад в результирующий поток в атмосферу может давать метан, высвобождающийся при дестабилизации газогидратов, находящихся на глубинах порядка 150 м и ниже от поверхности моря, при условии, что вышележащие слои донных отложений газопроницаемы. Ситуация осложняется тем, что на шельфе морей Восточной Арктики около 2 млн км² донных осадков представляют собой субаквальную реликтовую криолитозону, сформировавшуюся в период последнего гляциального максимума 18–20 тыс. л.н. в субаэральных условиях до затопления шельфа [5, 21, 29, 33]. Их мощность достигает 250 м, а газовая проницаемость близка к нулю, за исключением участков, где есть сквозные талики [6, 22].

Одна группа исследователей развивает идею, что повышенные концентрации метана в воде и воздухе на отдельных участках шельфа морей Восточной Арктики, а также наблюдаемые потоки пузырькового метана вблизи дна свидетельствуют о начале лавинообразно усиливающегося процесса, который, в конечном счёте, может иметь катастрофические последствия для глобального климата [14, 36, 37, 39]. Отметим, что гипотеза, получившая название «метангидратного ружья», была выдвинута ещё в 2000 г. в работе [26]. Она до сих пор находит широкий отклик в авторитетных массовых изданиях, обсуждающих проблемы науки на серьёзном уровне, например в газете «The Guardian» [16]. Другая группа исследователей, к которой в том числе относятся и авторы настоящей статьи, полагает, что концепция, название которой трансформировалось в «метановую катастрофу» (см. [14]), не имеет достаточных оснований [6, 22, 32].

Безусловно, существуют большие неопределённости оценки современного суммарного потока метана в атмосферу в районе шельфа морей Восточной Арктики, однако разногласие состоит лишь в том, усиливается оно в настоящее время или нет. Сторонники гипотезы метановой катастрофы исходят из того, что, по данным наблюде-

ний [22], в результате современного потепления температура придонных вод на шельфе морей Восточной Арктики в летний период с 1985 по 2009 г. на отдельных участках увеличилась на 1,5–2,1 °С, и постулируют, что это заметно увеличило газовую проницаемость субаквальных многолетнемёрзлых грунтов за счёт образования сквозных таликов. На такую возможность, при определённых условиях, благоприятных для оттаивания грунтов, указывают и результаты моделирования, опубликованные в работе [28]. При образовании таликов условия для выхода метана на поверхность из глубоких слоёв, где он образуется при дестабилизации газовых гидратов, улучшаются, что усиливает изменение климата и способствует дальнейшему нарастанию этого процесса [36, 37, 39]. Устойчивая, не зависящая от межгодовых вариаций положительная динамика потоков метана с акватории морей Восточной Арктики могла бы быть серьёзным аргументом в пользу этой гипотезы. Однако в более поздней работе [29] сделан другой вывод — образование новых таликов в донных отложениях шельфа за счёт современного потепления маловероятно.

Альтернативная точка зрения состоит в том, что наблюдаемые повышенные по сравнению со среднеширотными значениями концентрации метана на некоторых участках шельфа морей Восточной Арктики обусловлены геологическими факторами и источниками, действующими на протяжении нескольких тысяч лет, интенсивность большинства которых (за исключением современного биогенного метаногенеза органических осадков верхнего придонного слоя) не зависит от современного изменения климата. В наших предшествующих публикациях [6, 22] приводятся результаты модельных расчётов, из которых следует, что медленное оттаивание многолетнемёрзлых грунтов на шельфе морей Восточной Арктики связано, прежде всего, с затоплением этой территории 6–9 тыс. л.н. Согласно расчётам, в последующие столетия над слоем гидратов будет сохраняться газонепроницаемый слой мёрзлых грунтов, граница которого к концу текущего тысячелетия может опуститься до глубины порядка 90 м ниже уровня дна, находясь при этом выше верхней границы распространения газогидратов. Таким образом, в обозримом будущем не следует ожидать увеличения газовой проницаемости донных отложений, а следовательно, и усиления потока метана из глубоких гидратосодержащих слоёв.

При всей важности результатов математического моделирования гидротермического режима

субаквальных многолетнемёрзлых грунтов, оно не позволяет определить, чем обусловлены наблюдаемые на некоторых участках шельфа аномально высокие концентрации метана в воде. Данная статья посвящена именно этому вопросу. Сначала мы проанализируем данные о концентрации метана в воде и воздухе на акватории шельфа морей Восточной Арктики и примыкающих к ней участках суши, полученные различными методами, что позволит определить закономерности, обусловленные источниками на суше и на шельфе, а также динамику во времени. Затем рассмотрим пространственные закономерности концентрации метана, сравнивая их с расположением геологических разломов и русел палеорек. В заключительной части будет предложена концептуальная модель, которая описывает наблюдаемые особенности поля концентрации метана на шельфе рассматриваемых морей.

Сравнительный анализ данных наблюдений за концентрацией метана на шельфе морей Восточной Арктики

Морские экспедиционные и наземные стационарные наблюдения. В настоящее время существуют три независимых источника данных о концентрации метана в воде и нижней атмосфере на шельфе морей Восточной Арктики: морские и ледовые экспедиционные; сухопутные на стационаре в Тикси; спутниковые измерения. Длительные непрерывные наблюдения за содержаниями метана ведут и в лаборатории мониторинга климата в Бэрроу на Аляске, находящейся приблизительно на той же широте, однако в силу значительной удалённости от исследуемого региона непосредственно использовать эти данные невозможно. Первопричиной гипотезы о возможности метановой катастрофы в связи с эмиссией метана на шельфе морей Восточной Арктики послужили данные экспедиций 1995–2013 гг., в ходе которых измеряли концентрации метана в воде и в воздухе [39], а также вели видеонаблюдения пузырьковой эмиссии на отдельных участках дна [38]. Были установлены повышенные содержания метана на шельфе рассматриваемых морей, которые в некоторые годы на отдельных участках более чем в четыре раза превышали среднеширотную концентрацию в атмосфере (1,85 ppm) и достигали 8 ppm. Морские, вертолётные и ледовые экспедиционные измерения позволили получить пространственно распределённые данные о содержании метана в воде и приземном слое атмосферы, при этом к особенно-

стям наблюдений относилась их приуроченность в каждой точке к конкретным дням в относительно небольшом интервале времени работы экспедиции (как правило, сентябрь–октябрь).

Эти данные дополняют круглогодичные измерения концентрации метана в атмосфере, проводимые с 2010 г. автоматизированной станцией мониторинга парниковых газов на стационаре в Тикси. Программа измерений и технические возможности аппаратуры даны в публикации [13]. Многие морские экспедиционные маршруты, в которых отмечались аномально высокие концентрации метана [39], проходили в 50–100 км от стационара Тикси. При наличии на шельфе мощных действующих источников этих высоких концентраций, их влияние должно было обнаружиться при наблюдениях в Тикси. Между тем, как отмечают авторы работы [12], в Тикси ни разу не регистрировали атмосферные концентрации метана выше 2,1 ppm (рис. 1), что плохо согласуется с данными экспедиционных измерений на акватории, если, следуя авторам исследований [37, 38], предположить, что они репрезентативны и отражают массовый характер процессов, происходящих на большей части шельфа.

На рис. 1 отчётливо выделяются годовые максимумы, приходящиеся на сентябрь–октябрь. В это время многие факторы способствуют сезонному увеличению эмиссии метана. Так, площадь морских льдов достигает ежегодного минимума и водная поверхность открывается. Слой сезонного оттаивания многолетнемёрзлых грунтов на суше, в котором возможен биогенный метаногенез, достигает максимума, при этом возрастает транспорт органических веществ реками. Осенняя штормовая активность в сочетании с уменьшенной прочностью многолетнемёрзлых грунтов также способствует увеличению потока органического вещества, выносимого на шельф за счёт береговой эрозии. Относительно высокая температура придонных вод в конце тёплого сезона и наличие размываемого по шельфу органического субстрата безусловно усиливают биогенный метаногенез в придонном слое осадков.

Эти данные позволяют сделать вывод, что все морские экспедиционные измерения, выполнявшиеся именно в осенние месяцы, соответствуют сезонным максимумам концентрации метана и могут быть нерепрезентативны для среднегодовых величин. Наблюдения в Тикси, напротив, дают исчерпывающую круглогодичную информацию, но лишь для одной точки. В работе [12] сравни-

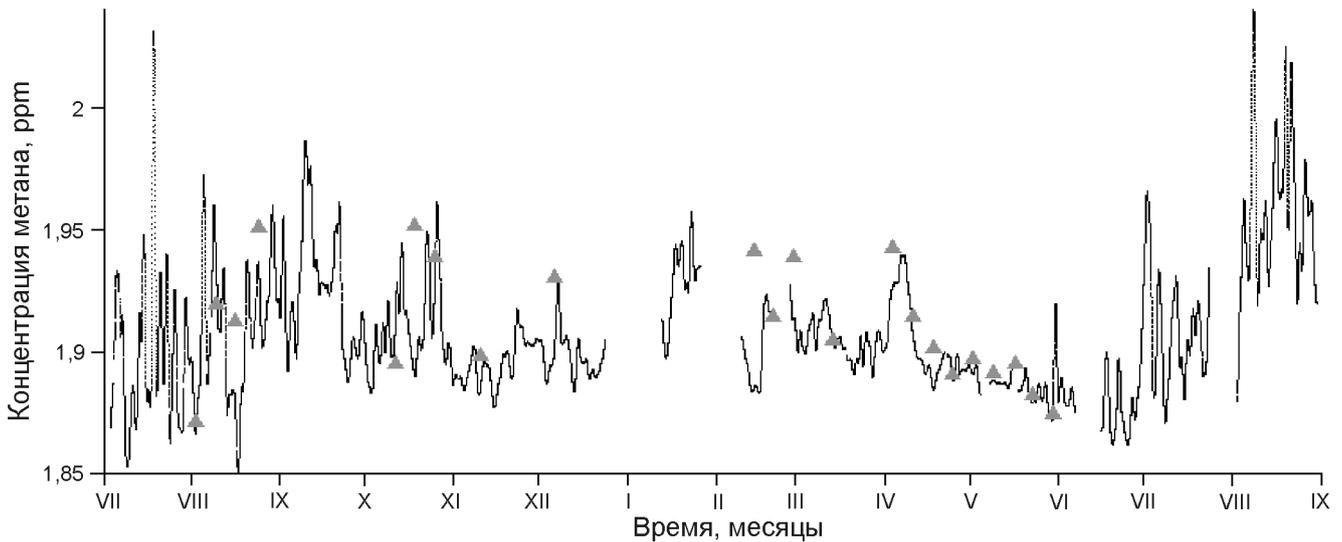


Рис. 1. Данные наблюдений атмосферной концентрации метана на стационаре Тикси в 2010–2011 гг. Кривая с разрывами, обусловленными отсутствием подачи электропитания на станцию – данные автоматизированных измерений; треугольники – данные фляжечных измерений [12]
Fig. 1. Observed atmospheric methane concentration in Tiksi, 2010–2011 data. Curve represents automated observations, gaps are due to the electric power outage. Flask sampling data are indicated by triangles [12]

ваются измерения метана, проводимые на арктических станциях в четырёх пунктах: Тикси и Терриберка в России; Бэрроу, также расположенном вблизи шельфа, на севере Аляски; Алерт, находящимся вне зоны шельфа на канадском о. Элсмир, в 817 км от Северного полюса. В ней отмечено, что в 2002–2010 гг. не наблюдалось не только аномальных, но даже просто высоких значений среднегодовых концентраций метана, при том, что в период (сентябрь), когда площадь морских льдов достигает минимума, в районе Тикси концентрации метана были на 10–14 ppb выше, чем в Терриберке, и на 20–26 ppb больше, чем в Бэрроу. На станции Алерт концентрации всегда ниже, чем где-либо, что обусловлено отсутствием шельфа и воды, полностью свободной ото льда даже в летние месяцы. По этой причине авторы [12] полагают, что данные этой станции хорошо характеризуют морской фон, но не показательны для шельфа.

Спутниковые наблюдения – непрерывны как во времени, так и в пространстве. Многие из них, в частности атмосферная концентрация метана, есть в свободном доступе (см., например, <http://www.nsof.class.noaa.gov/saa/products/> или data.gosat.nies.go.jp). Кроме того, они позволяют отслеживать многолетнюю динамику концентраций метана для любой территории. На основании этих данных можно установить постоянно действующие региональные источники и оценить изменения их ин-

тенсивности, при этом необходимо учитывать возможности и технические ограничения спутниковых измерений. Содержание примесей в атмосфере оценивается по ослаблению излучения в спектральных диапазонах, соответствующих максимумам полос поглощения исследуемого газа. В находящихся на орбите спутниках применяют два типа спектрометров, в которых источником излучения служит либо Солнце (для измерений метана используют полосы поглощения ближней инфракрасной области спектра 0,76; 1,6 и 2,0 мкм), либо поверхность Земли и сама атмосфера (средний ИК-диапазон, длина волны около 7,6 мкм). В первом случае солнечное излучение пронизывает всю атмосферную толщу и отражается от подстилающей поверхности. Примеры спутниковых приборов – SCIAMACHY и TANSO. Для Арктических районов, особенно их морской части, эта методика не вполне подходит из-за экспериментальных трудностей, которые обусловлены низкой высотой Солнца над горизонтом, отсутствием солнечного излучения во время полярной ночи и низкой отражательной способностью океана и льда в ближней ИК-области.

Приборы, работающие в средней ИК-области спектра (AIRS, IASI, TES, TANSO, CrIS), регистрируют излучение поверхности Земли и нижних более тёплых слоёв тропосферы. И днём, и ночью спектр можно измерять с высокой точностью, однако и здесь существуют принципиальные

ограничения метода. Одно из них состоит в том, что до спутника доходит собственное излучение поверхности или приземного слоя атмосферы в том случае, когда над ним нет более тёплых слоёв, которые не только поглощают, но и переизлучают световую энергию в среднем ИК-диапазоне. В этом случае спутник регистрирует спектр излучения вышерасположенных слоёв и «не видит» на их фоне ничего, что расположено ниже. Из этого следует, что данным методом невозможно измерить концентрацию газов в приземном слое в случае температурной инверсии. При отсутствии инверсии чувствительность метода будет тем выше, чем больше температурный градиент в атмосфере. В применении к Арктике это означает, что наиболее благоприятные условия для измерения концентраций метана складываются над поверхностью океана, свободной ото льда.

Зимние инверсии, характерные для морей Восточной Арктики, приводят к тому, что спутник перестаёт «видеть» нижний слой атмосферы, особенно надо льдом, и регистрирует спектр, излучаемый более тёплым расположенным выше слоем. Однако в августе—октябре, когда акватория свободна ото льда, вертикальная граница чувствительности спутника к концентрации опускается и по получаемому спектру можно лучше судить о содержании метана в нижнем слое атмосферы. Нижняя граница этого слоя, т.е. предел чувствительности прибора, определяющего низший по вертикали уровень, который он видит, пока точно не известна. Используя данные синхронных измерений концентраций метана на корабле и со спутников, мы сформулировали предположение, что нижняя граница чувствительности спектрометров, работающих в полосе поглощения метана 7,6 мкм, при благоприятных для измерений условиях находится на высоте 2–3 км над поверхностью океана. В контексте проблемы, рассматриваемой в данной статье, важен вопрос о том, до каких высот простираются повышенные концентрации метана от локальных источников. Если пространственные неоднородности концентрации метана обусловлены слабыми источниками и не выходят за пределы пограничного слоя, высота которого редко превышает 1,5 км, то обнаружить их со спутника трудно даже при оптимальных атмосферных условиях. Если же речь идёт о мощных источниках, действие которых проявляется и на больших высотах, то они могут быть исследованы с помощью спутниковых наблюдений.

Многие данные спутниковых спектрометров, работающих в среднем ИК-диапазоне, имеются в

свободном доступе. К ним относятся измерения со спутников AIRS/Aqua (с 2002 г.), IASI-1/Metop-A (с 2007 г.), IASI-2/Metop-B (с 2012 г.) и TANSO/Ibuki (с 2009 г.). Мы использовали данные первых двух спутников. Спектрометр IASI имеет более высокое спектральное разрешение, чем AIRS, поэтому можно ожидать, что его данные (<http://www.nsof.class.noaa.gov/saa/products/welcome>) более чувствительны к нижним слоям атмосферы. Методики обработки спектров AIRS и IASI для получения профилей метана описаны в работах [42, 43]. Там же содержатся сведения о валидации данных с помощью независимых измерений, хотя количество последних для морей Арктики невелико.

На рис. 2 показаны осреднённые за 2009–2013 гг. среднемесячные данные спутника IASI о концентрации метана в нижней атмосфере (0–4 км) для четырёх месяцев летне-осеннего периода, когда региональные источники достигают наибольшей интенсивности, а атмосферные условия благоприятны для измерений в среднем ИК-диапазоне. Для лучшего выявления динамики использованы разные шкалы. На картах для августа—сентября максимум шкалы – 1905 ppb, для октября—ноября – 1920 ppb. На картах отчётливо прослеживается формирование локального максимума над континентальной криолитозоной с характерными концентрациями 1890–1895 ppb в августе и более 1900 ppb – в сентябре. Он обусловлен ростом температуры грунтов и биогенным метаногенезом в сформированном к этому времени сезонно-талом слое.

В октябре и ноябре над континентальной криолитозоной концентрация метана резко падает, причём, как видно на картах, процесс этот развивается в направлении с востока на запад в соответствии с началом промерзания грунтов с поверхности, которое изолирует остаточный талый слой и препятствует дальнейшему выходу из него метана. В этот период меняются и условия наблюдений. С установлением снежного покрова и уменьшением приземной температуры чувствительность прибора к нижним слоям атмосферы падает и измеренная концентрация соответствует более высоким слоям. Показательно наличие в этот период локальных максимумов вблизи рек, где продолжается биогенный метаногенез и сохраняются пути выхода в атмосферу до тех пор, пока река не покрывается льдом. В это же время значительно возрастают концентрации метана над акваторией, где ещё сохраняется открытая вода и температура поверхности остаётся близкой к 0 °С.

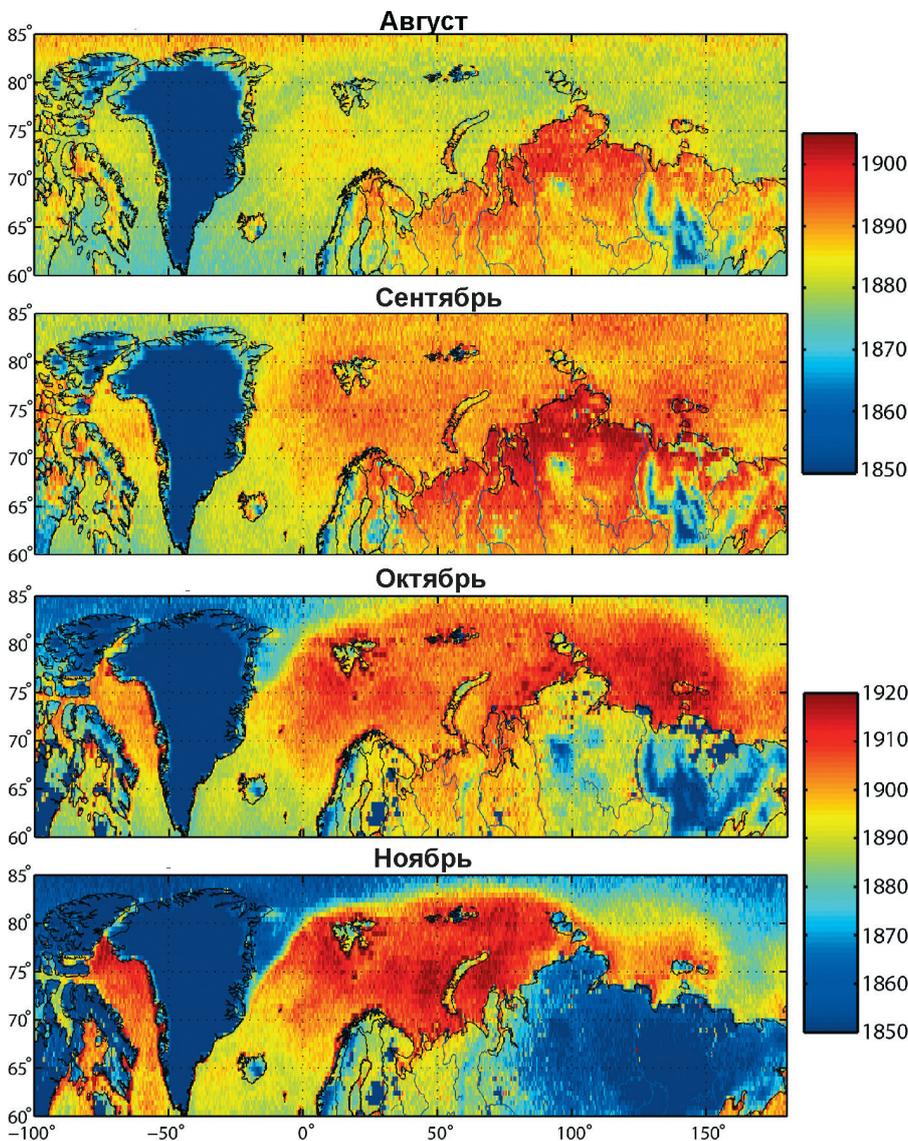


Рис. 2. Осреднённые за период 2009–2013 гг. среднемесячные концентрации метана (ppb) в нижней атмосфере (0–4 км) за август–ноябрь.

Данные спутника IASI-1/Метоп-А (<http://www.nsof.class.noaa.gov/saa/products/welcome>). При построении карт не учитывались данные, полученные в условиях облачности

Fig. 2. Averaged over the 2009–2013 period mean monthly methane concentrations (ppb) in the lower atmosphere (0–4 km) for August–November.

Maps are based on IASI-1/Metop-A satellite data (<http://www.nsof.class.noaa.gov/saa/products/welcome>). Data obtained under cloudy conditions were discarded

Максимум концентрации метана — около 1920 ppb — достигается непосредственно перед тем, как акватория покрывается льдом, причём осенний ледостав начинается в восточной части и развивается в направлении на запад, что хорошо видно на рис. 2. Эти процессы протекают не только на шельфе морей Восточной Арктики, но и вдоль всего арктического побережья. Отчётливое повышение концентраций метана отмечается в октябре–ноябре вдоль берегов Скандинавии, Новой Земли, Шпицбергена, Земли Франца-Иосифа, а также восточного побережья Гренландии. Биогенная продукция метана возможна в этих районах благодаря субстрату, поставляемому в результате береговой эрозии. Отметим также значительное повышение от октября к ноябрю концентрации метана над Баренцевым, Карским морями и Баффиновым заливом. Для

определения источника метана в этих районах требуются дальнейшие исследования.

Для определения динамики концентрации метана в районе шельфа МВА мы использовали также данные спутника AIRS, но с меньшим разрешением (ftp://anonymous@acdisc.gsfc.nasa.gov/ftp/data/s4pa/Aqua_AIRS_Level3/AIRX3STM.006). В качестве метрики, характеризующей интенсивность локальных источников, использована разность между осреднённой по региону [70–80° с.ш., 60–180° в.д.] и глобальной концентрацией метана для каждого месяца в период 2002–2013 гг. Результаты показали, что отклонения концентраций над шельфом от глобальных значений для летне-осенних месяцев (август–октябрь) имеют либо слабоотрицательный, либо близкий к нулю тренд. При всей условности этой оценки в связи с коротким

рядом наблюдений (12 лет) и возможными ошибками спутниковых данных полученный результат не даёт оснований считать, что интенсивность источников метана на шельфе морей Восточной Арктики в настоящее время усиливается.

Источники метана на шельфе морей Восточной Арктики и влияющие на них факторы

Согласно современным представлениям, на шельфе возможны два вида источников. В одном случае из донных отложений в воду поступает ранее синтезированный метан, который прежде был связан или находился в замкнутом пласте, содержащем углеводороды. К этому типу относятся источники, в которых метан высвобождается за счёт диссоциации газовых гидратов. В другом случае источник — биогенный метаногенез. Он может быть как в придонном слое органических осадков, так и на суше, в анаэробных условиях, прежде всего на переувлажнённых территориях, в термокарстовых озёрах и болотах криолитозоны при их сезонном оттаивании. За счёт этого процесса в зоне севернее 50° с.ш. в атмосферу ежегодно поступает 25–100 Тг метана, в том числе — 8–30 Тг из тундры, а оставшаяся часть — из бореальных лесов [31]. Интенсивность биогенного метаногенеза сильно зависит от температуры, по которой можно определить обусловленность источника этим механизмом, анализируя изменения, подобные показанным на рис. 2.

Диссоциация гидратов вызывает большие опасения, и неоднократно предпринимались попытки оценить её потенциальное воздействие на климат. В работе [15] рассмотрены два сценария: «медленная» эмиссия метана из глубинных гидратов на шельфе морей Восточной Арктики (50×10^3 Тг за 50 лет); «быстрая» эмиссия, когда такое же количество высвобождается за 1–5 лет. При втором сценарии к концу XXI в. глобальная температура, по оценкам этих авторов, увеличится на 1,3 °С больше, чем без дополнительного метанового воздействия (3,3 и 2,0 °С соответственно).

Очевидно, что воздействие на климат зависит не только от количества выделяющегося из гидратов метана, но и от чувствительности к нему глобальной температуры воздуха. О её величине можно судить по результатам, полученным при расчётах по климатической модели Института физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН [23]. Показано, что учёт обратной связи за счёт эмиссии метана от глобальных источников на суше при различных климатических сценариях (от самого консервативного RCP-2.6 до наиболее

агрессивного RCP-8.5) увеличит прогнозируемый рост глобальной температуры воздуха менее чем на 4%. Так, для RCP-8.5 расчётное увеличение эмиссии метана на суше за 100 лет составит около 80 Тг/год, изменившись со 150 Тг/год в конце XX в. до 230 Тг/год к концу XXI в., а атмосферная концентрация удвоится, достигнув 3900 ppm. По этому сценарию за 100 лет глобальная температура повысится примерно на 4 °С, из которых не более 4%, т.е. 0,16 °С, будет обусловлено ростом концентрации атмосферного метана.

Эта оценка чувствительности глобального климата к потоку метана очень близка и лишь немногим больше полученной ранее в работе [6], авторы которой установили, что поток метана 6–8 Тг/год приведёт к росту глобальной температуры воздуха примерно на 0,012 °С. При этом обе оценки в два с лишним раза больше полученной в расчётах по модели Института вычислительной математики РАН (неопубликованные данные представлены на отчётной конференции по междисциплинарному проекту РФФИ, Е.М. Володин, март 2013 г.), изучающего климатическое воздействие эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики.

Вертикальная сетка модели была изменена таким образом, чтобы в районе шельфа температурный профиль рассчитывался до глубин порядка 1 км ниже уровня дна, что позволяло рассчитать термические условия диссоциации гидратов, а также обусловленные ей высвобождение метана и воздействие на глобальный климат. Эксперимент предусматривал получение максимальной оценки, поэтому задавался большой поток геотермального тепла ($0,1 \text{ Вт/м}^2$), характерный скорее для геологических разломов, чем для шельфа в целом, где более реалистичны величины $0,04\text{--}0,08 \text{ Вт/м}^2$ (см. [29]). В результате моделирования с такими параметрами сделан вывод, что к концу XXI в. эмиссия метана за счёт диссоциации гидратов на шельфе рассматриваемых морей может достигнуть 800 Тг/год. При том, что современный глобальный поток от всех источников оценивается в 550–600 Тг/год [31], это — очень большая добавка, которая, тем не менее, может повысить глобальную температуру не более чем на 0,5 °С, а не на 1,3 °С, как считают авторы исследования [15].

Между тем, даже такая оценка завышена и не столько из-за нереалистично заданного геотермального потока, сколько из-за предположения о высокой газовой проницаемости всей толщи донных отложений. Предполагалось отсутствие запирающих слоёв, к которым относятся мёрзлые

грунты, препятствующие выходу на поверхность метана из глубоких гидратосодержащих слоёв, находящихся, по меньшей мере, на глубине 150 м от ур. моря [6]. Известно, что в замкнутых полостях внутри мёрзлых грунтов происходит самоконсервация гидратов [11], обусловленная тем, что газогидрат занимает в 164 раза меньший объём, чем содержащийся в нём метан при нормальном давлении [34]. В случае термической диссоциации в газонепроницаемых мёрзлых грунтах высвобождается газ, многократно увеличиваясь в объёме, создаёт избыточное давление, что и приводит к самоконсервации согласно уравнению равновесного состояния гидратов. Таким образом, этот вид эмиссии возможен лишь при отсутствии мёрзлых газонепроницаемых грунтов над гидратосодержащим слоем. В наших предшествующих работах мы показали, что на большей части шельфа морей Восточной Арктики в современных и прогнозируемых на несколько столетий климатических условиях это условие не выполняется [6, 22]. Иная ситуация, которая будет рассмотрена далее, имеет место на участках шельфа этих морей с тальми и газопроницаемыми донными отложениями, прежде всего вблизи геологических разломов, русел палеорек и термокарстовых озёр, под которыми до затопления шельфа могли образоваться сквозные талики.

Пространственные закономерности поля концентрации метана и структуры многолетнемёрзлых грунтов шельфа

Совместный пространственный анализ данных морских измерений и структуры многолетнемёрзлых грунтов позволяет установить закономерности, по которым можно судить о локализации и типе источников метана на шельфе морей Восточной Арктики. Для этого мы создали цифровую геоморфологическую карту пространственной структуры многолетнемёрзлых грунтов шельфа. На ней обозначены участки, где такие грунты отсутствуют, донные отложения газопроницаемы и метан, если имеет место его высвобождение в глубоких гидратосодержащих слоях, может подниматься на поверхность. В основу положена база геологических данных, содержащая координатные линии рифтовых зон на шельфе, где высокие значения геотермального потока тепла (более $0,1 \text{ Вт/м}^2$) изначально препятствовали формированию многолетнемёрзлых грунтов. Рифтовая система моря Лаптевых достаточно хорошо изучена и описана в публикации [9]. На карте, приведённой в этой работе, показано расположение разломов и тали-

ков, образовавшихся под термокарстовыми озёрами и речными руслами до затопления шельфа. Данные по более обширному региону, выходящему за границы шельфа, приведены в работе [7]. Все имеющиеся геологические материалы обобщены в совместном проекте ВСЕГЕИ и Геологической службы США. В результате разработан первый вариант цифровой геологической карты арктических морей, который и использован в нашей работе.

Составленную карту мы дополнили палеоморфологическими данными о руслах палеорек на современном шельфе, которые служили продолжением русел и дельтами сибирских рек. Одна из первых карт палеорек на шельфе морей Восточной Арктики опубликована М. Холмсом и У. Кригером в 1974 г. [24]. На ней в современном рельефе шельфа моря Лаптевых прослеживаются пять долинных систем: Прахатанги – Анабара; Лены – Оленька; собственно Лены (Западная Лена); Лены – Омолоя (Восточная Лена); Праяны. На Восточно-Сибирском шельфе выделены две крупные долинные системы – Праиндигирки и Праколымы. Затопленные долины установлены на основании комплекса дешифрованных гидрометрических признаков и сейсмоакустического профилирования. Все долинные системы заканчиваются в районе изобаты 50 м, глубже этих отметок следы долинной сети теряются.

В последующем был продолжен сбор данных о руслах палеорек, изменениях береговой линии и положении речных дельт на основе геоморфологических признаков, к которым относятся характерные формы осадконакопления. На основании этих материалов И. Вейнбергс [8] построил новую карту, которая уточнила и дополнила более раннюю данными о затопленных долинах палеорек восточной части шельфа, т.е. рек Колыма, Певек и Чаун. В 1998 г. опубликованы результаты исследования стока палеорек Арктики, выполнявшиеся немецким Институтом полярных и морских исследований имени Альфреда Вегенера [40]. В ходе этого проекта многие данные, опубликованные в 1974 г. Холмсом и Кригером на первой карте палеорусел, подтвердились. В то же время некоторые точки старой карты, в частности на внешней границе шельфа моря Лаптевых, были исключены, так как вблизи них не были обнаружены характерные речные осадки. Данные о руслах палеорек шельфа моря Лаптевых для плейстоцена опубликованы также в виде карты в обзорной статье [20].

На рис. 3 приведена геоморфологическая карта шельфа морей Восточной Арктики, построенная с

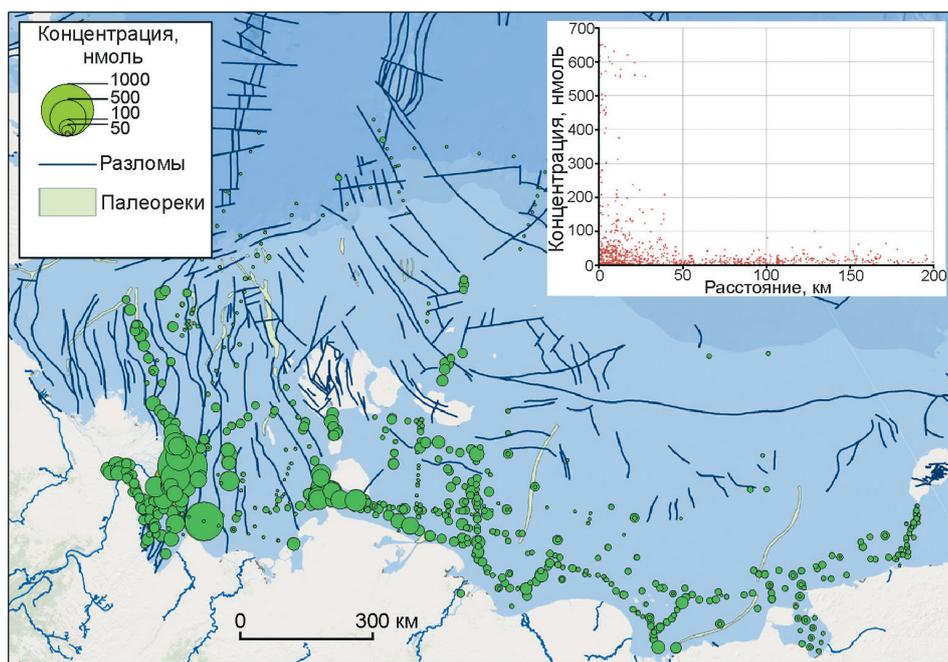


Рис. 3. Карта шельфа морей Восточной Арктики с указанием местоположения геологических разломов, палеорек и точек отбора проб воды.

Размер символов пропорционален концентрации метана в воде. Диаграмма на вставке показывает зависимость между концентрацией метана и расстоянием до ближайшего разлома или палеоруслу (см. данные в таблице)

Fig. 3. Map of the fault zones, paleo river beds, and water sampling in the shelf of the East Siberian Arctic Seas.

Symbol size is proportional to methane content in the water. Graph in the insert illustrates the relation between the methane concentration and the distance to the nearest fault zone or paleo river bed (ref. data in the Table)

использованием всех имеющихся данных. Сплошными линиями и контурами с заливкой показаны геологические разломы и палеоруслу, где отсутствуют многолетнемёрзлые грунты и донные осадки газопроницаемы. На карту нанесены данные морских измерений концентрации метана в воде, полученные И.П. Семилетовым и доступные на сайте проекта <http://research.iarc.uaf.edu/SSSS/data2010.php>. Места отбора проб обозначены символами, размер которых пропорционален концентрации метана. В работе [39] эти данные были представлены в виде сплошного поля, полученного пространственной интерполяцией. На наш взгляд, такая модель плохо подходит для описания концентраций метана в водах шельфа. Более адекватную картину даёт суперпозиция фонового поля с характерными концентрациями 20–40 нмоль (при арифметическом среднем всех измерений 34,4 нмоль) и отдельных спорадических пиков с концентрациями выше фоновой (до 500 нмоль), среднее арифметическое которых составляет 292,2 нмоль.

Вставка на рис. 3 показывает зависимость между концентрацией метана в воде и расстоянием до ближайшего разлома или палеоруслу. Эти же данные представлены в таблице. Данные, выделенные в таблице курсивом (графы 2–11), соответствуют концентрациям выше заданного уровня (графа 1) с градацией по расстояниям до разломов и палеоруслу в диапазоне от 0–1 до > 50 км; в строках, выделенных курсивом, приводится число точек изме-

рений, попадающих в соответствующий класс по концентрации (графа 1) и расстоянию (графы 2–11). В графе 12 приведено общее число измерений, в графах 13 и 14 – 60% и 95%-е квантили распределения расстояний (q_{60} и q_{95}), т.е. расстояния до разломов или палеоруслу, на которые приходятся 60 и 95% всех точек в данном классе концентраций.

Визуальный анализ карты, данные таблицы и вставка на рис. 3 показывают, что, за редким исключением, точки с высокими концентрациями находятся на небольшом расстоянии от разломов и палеоруслу. Иными словами: мощные источники метана на дне шельфа, на существование которых неоднократно указывали авторы публикаций [14, 15, 37, 39], локализованы преимущественно там, где в силу особенностей геологического строения отсутствуют многолетнемёрзлые грунты и имеются пути выхода газа из глубоких донных отложений на поверхность. Есть лишь несколько исключений, т.е. три точки с концентрациями выше 500 нмоль в диапазоне расстояний 20–30 км от разломов и палеоруслу и ещё пять таких точек на расстоянии 10–20 км (см. таблицу) – большинство из них находится в проливе Дмитрия Лаптева. Существование подобных точек вполне закономерно, поскольку в нашем анализе не учтены талики, сформировавшиеся под палеотермокарстовыми озёрами. Их наличие не вызывает сомнений, но данные об их местоположении немногочисленны. Отмеченные исключения могут объясняться, в том числе, и наличием подозрительных таликов.

Характеристика концентраций метана в воде

Заданные уровни концентрации метана, нмоль	Число измерений (курсив) в диапазонах расстояний до ближайшего разлома или палеорула (км), в которых отмечены концентрации метана выше заданного уровня										Общее число измерений	q60%	q95%
	0–1	1–2	2–3	3–5	5–10	10–20	20–30	30–40	40–50	> 50			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	16	36	31	60	132	206	83	63	46	340	1013	36	154
20	10	25	21	37	73	109	36	30	11	55	407	15,6	125
30	10	20	18	34	61	84	26	21	7	22	303	12	100,8
50	8	14	9	18	33	55	14	15	4	6	176	11	40
100	7	12	6	12	10	34	10	5	0	0	96	10	28
150	7	11	5	12	5	16	7	3	0	0	66	9	26,8
200	4	9	4	12	4	11	5	1	0	0	50	6	22,7
250	4	7	4	12	4	7	3	0	0	0	41	4	21
300	3	6	3	12	4	7	3	0	0	0	38	4	21
350	3	6	3	11	4	6	3	0	0	0	36	4	21
400	3	6	3	10	4	5	3	0	0	0	34	4	21
450	3	6	3	6	4	5	3	0	0	0	30	4,8	21
500	3	4	2	2	4	5	3	0	0	0	23	8,2	21

Обсуждение результатов

Результаты анализа, представленные в статье, проясняют роль шельфа морей Восточной Арктики в геобиосферной системе, в частности воздействие на её устойчивость через изменение климата, обусловленное эмиссией метана. Необходимость изучения этого вопроса продиктована многими соображениями. Как мы уже отмечали, в последнее время словосочетание «метановая катастрофа» широко и уверенно употребляется не только в средствах массовой информации (см. публикацию [16]), но и в российских [14], и в зарубежных [39] высокорейтинговых научных журналах. В 2011 г. оно было вынесено в название конкурса междисциплинарных проектов РФФИ в применении к шельфу морей Восточной Арктики, а годом ранее – аналогичного конкурса проектов Евросоюза. Между тем, возможность сильного влияния на глобальный климат мощных выбросов метана из глубоких слоёв под большим давлением через талики пока лишь гипотетическая, как и тезис об увеличении газовой проницаемости донных отложений из-за увеличения количества и размера таких таликов в слое многолетнемёрзлых грунтов. Гипотезу о метановой катастрофе можно поставить под сомнение по нескольким причинам.

Во-первых, при употреблении слова «катастрофа» следует отчётливо сформулировать, в чём она выражается. Из контекста может сложиться впечатление, что речь идёт о сильном воздействии на кли-

мат, которое приведёт к быстрому и значительному росту температуры воздуха, вызвав каскад связанных с этим природных изменений. Между тем, расчёты различных авторов, которые приводятся в данной статье, показывают, что эмиссия метана из источников на шельфе в состоянии увеличить глобальную температуру до конца XXI в. не более чем на одну-две десятые доли градуса. Это совершенно незначимо на фоне воздействия других меняющихся факторов.

Во-вторых, проведённый в статье анализ не подтверждает, что интенсивность расположенных на шельфе морей Восточной Арктики источников метана в настоящее время увеличивается. Спутниковые измерения за последние 12 лет показывают примерно такой же рост концентрации метана над акваторией этих морей, как и глобальный или даже чуть меньший. Выявляемая наблюдениями сильная межгодовая изменчивость, как и динамика в летне-осенние месяцы, отчётливо прослеживаемая на картах рис. 2, типична для бактериального метаногенеза, интенсивность которого зависит от условий конкретного года, причём в наибольшей степени – от температуры. Если бы доминирующую роль играл выход метана через талики из глубоких гидратосодержащих слоёв, где практически отсутствуют межгодовые вариации, то интенсивность источников была бы либо постоянной, либо возрастающей год от года в случае активного образования новых таликов, увеличивающих газовую проницаемость донных осадков. Тезис, высказанный в работе [39],

что биогенный метаногенез не объясняет мощных источников на шельфе, неубедителен, поскольку данные пространственного анализа на рис. 3 и таблицы показывают, что в большинстве случаев они локализованы вблизи разломов и русел палеорек, где возможен выход значительных количеств метана из глубоких слоёв и его фонтанирование, при том, что нет причин говорить о росте числа таких аномальных зон. Более точный ответ можно было бы получить на основе изотопного анализа, определив доли метана современного биогенного и древнего газогидратного происхождения.

В-третьих, в истории Земли после гляциально-максимума позднего плейстоцена уже был более тёплый, чем в настоящее время, период в оптимум голоцена. Никакие сведения не подтверждают наличие изменений, которые можно было бы назвать катастрофическими, при том, что процессы на шельфе должны были быть во многом идентичны современным. И, наконец, в контексте современных глобальных проблем следовало бы корректно выбирать термины для обозначения гипотетически возможных, но пока ещё не подтверждённых событий, поскольку это может иметь последствия, выходящие за рамки естественных наук. Можно привести пример из недавнего прошлого в отношении предполагаемого усиления эмиссии метана при таянии болот криолитозоны Сибири, которое в ряде публикаций, главным образом в средствах массовой информации, необдуманно называли «метановой бомбой». Этот период совпал с пиком международных переговоров об учёте и ограничении национальных выбросов парниковых газов и о торговле их квотами, в которых Россия имела сильную позицию как страна, леса которой, занимая 50,9% её площади (890,8 млн га), поглощают огромное количество атмосферного углерода. В среднем, за 1990–2007 гг. ежегодный сток углерода в фитомассу только лишь управляемых лесов составил 96,2 Тг [10]. Ряд государств пытался обыграть концепцию метановой бомбы, сместив акценты на переговорах таким образом, чтобы девальюировать роль естественных поглотителей углерода в лесной зоне России.

Это во многом мотивировало проведение авторами в 2005–2010 гг. исследований, результаты которых опубликованы в серии статей [1–4, 17, 18]. В них была построена пространственно-распределённая математическая модель криолитозоны, учтены расположение и площадь торфяников на территории России, рассчитаны изменения интенсивности эмиссии метана в меняющихся мерзлотно-климатических условиях и дана оценка ра-

диационного воздействия, которое ведёт к росту температуры воздуха. В результате установлено, что связанное с таянием торфяников увеличение эмиссии метана к середине XXI в. составит дополнительно примерно 8–10 Тг в год даже для наиболее радикального климатического сценария. Отметим, что оценка современной эмиссии метана с шельфа морей Восточной Арктики, по данным работы [39], составляет 7,9 Тг в год, т.е. практически совпадает с нашей величиной. При среднем времени жизни метана в атмосфере около 12 лет, такая эмиссия вызывает рост его концентрации примерно на 100 Тг или на 40 ppb, что увеличивает среднегодовую глобальную температуру приблизительно на 0,012 °С. Эти результаты признаны многими специалистами, и гипотезу метановой бомбы при таянии сибирских болот вскоре перестали обсуждать даже в популярных изданиях, что позволило снять сенсационный характер проблемы и создать условия для её дальнейшего научного изучения.

Приведённый пример показывает, что проблема дестабилизации гидратов на арктическом шельфе и связанные с этим последствия имеют как естественнонаучную, так и геополитическую составляющую, особенно в современных условиях конкуренции за ресурсы Арктики. Это обуславливает повышенные требования к достоверности и степени научной проработки получаемых результатов и накладывает серьёзную ответственность на учёных при интерпретации данных. По нашему мнению, никакие из полученных в настоящее время научных результатов не поддерживают гипотезу о метановой катастрофе на шельфе морей Восточной Арктики. Данное словосочетание имеет отчётливую сенсационную направленность, а его широкое и вольное употребление в публикациях не соответствует парадигме современной науки об окружающей среде. Очень точно концепцию метановой катастрофы характеризует высказывание канадского исследователя-этнолога исландского происхождения В. Стефенсена (1879–1962), приводимое в публикации [19]: «В Арктике существуют как реальные, так и воображаемые проблемы, причем из этих двух воображаемые наиболее реальны».

Истинно научные вопросы в отношении процессов углеродного газообмена на шельфе морей Восточной Арктики, которые ещё предстоит выяснить в контексте глобального изменения климата, лежат в иной плоскости. Они предусматривают: изучение динамики эмиссии метана на основе регулярных морских, наземных и спутниковых наблюдений; исследование структуры осадочной

толщи, контролирующей расположение газовых и газогидратных залежей; установление компоненты газообмена, чувствительной к вариациям и изменению климата; построение полной количественной модели углеродного цикла шельфа рассматриваемых морей. На решение этих задач нацелены наши дальнейшие исследования.

Благодарности. Авторы выражают признательность Xiazhen Xiong (NOAA) за полезную дискуссию и советы по отбраковке недостоверных измерений спутника IASI. Мы признательны рецензентам – Е.А. Слагоде и П.В. Богородскому – за высказанные конструктивные замечания, которые позволили улучшить статью и устранить терминологические неточности.

Данная работа поддерживается немецко-российской лабораторией полярных исследований им. Отто Шмидта, проекты OSL-13-02 и OSL-14-03, а также РФФИ (проекты 12-05-31481 мол_а, 13-05-91171-ГФЕН_а, 13-05-00072).

Литература

1. *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 / Ред. Ю.А. Израэль. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. С. 124–142.
2. *Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А.* Оценка изменения эмиссии парниковых газов из многолетнемерзлых болот криолитозоны России в условиях глобального потепления // Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии / Ред. Г.В. Менжулин. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. С. 114–138.
3. *Анисимов О.А., Величко А.А., Еришова А.А., Нечаев В.П., Ренева С.А., Стрельченко Ю.Г.* Многолетнемерзлые породы Северной Евразии в прошлом, настоящем и будущем: оценки, основанные на синтезе наблюдений и моделирования // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы / Ред. В.М. Котляков. М.: изд. ИГ РАН, 2009. С. 134–145.
4. *Анисимов О.А., Ренева С.А.* Углеродный баланс в криолитозоне России и глобальный климат: современное состояние и прогноз, основанный на моделировании // Полярная криосфера и воды суши / Ред. В.М. Котляков. М.-СПб.: Paulsen, 2011. С. 122–140.
5. *Анисимов О.А., Анохин А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Павлов А.В., Романовский В.Е., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И.* Континентальная многолетняя мерзлота // Методы изучения последствий изменений климата для природных систем / Ред. С.М. Семенов. М.: изд. ВНИИГМИ, 2012. С. 268–328.
6. *Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Лавров С.А., Стрельченко Ю.Г.* Современная динамика подводной мерзлоты и эмиссия метана на шельфе морей Восточной Арктики в контексте прошлых и будущих изменений климата // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 97–105.
7. *Анохин В.М., Гусев Е.А.* Разрывная тектоника зоны сочленения океанической и континентальной коры в море Лаптевых // Вестн. Томского гос. ун-та. Проблемы геологии и географии Сибири. Материалы науч. конф. Приложение № 3 (I). Апрель 2003. С. 46–55.
8. *Вейнберс И.Г.* Затопленные речные долины на шельфе и связь их образования с колебаниями Мирового океана (на примере шельфа Восточно-Сибирского моря и юго-западной части Охотского моря) // Геоморфология и палеогеография шельфа: Материалы XII пленума Геоморфологической комиссии. М.: Наука, 1978. С. 37–42.
9. *Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хубертен Х.В.* Палеогеографический сценарий последледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 1. С. 39–50.
10. *Израэль Ю.А., Бедрицкий А.И., Фролов А.В., Блинов В.Г., Груза Г.В., Семенов С.М., Анохин А., Гитарский М.Л., Романовская А.А., Ясюкевич В.В., Болтнева Л.И., Зеленов А.С., Егоров В.И., Карабань Р.Т., Кухта А.Е., Нахутин А.И., Седякин В.П., Яковлев А.Ф., Гершинкова Д.А., Артемов Е.М.* Пятое национальное сообщение Российской Федерации. М.: изд. Росгидромета, 2010. 196 с.
11. *Истомин В.А., Якушев В.С., Махонина Н.А., Квон В.Г., Чувилин Е.М.* Эффект самоконсервации газовых гидратов // Газовая промышленность. Специальный выпуск: Газовые гидраты. 2006. № 3. С. 36–46.
12. *Решетников А.И., Ивахов В.М.* Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции Тикси (сравнение с данными судовых наблюдений на шельфе моря Лаптевых) // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова / Ред. В.М. Катцов, В.П. Мелешко. СПб.: Гидрометеоздат, 2012. С. 257–269.
13. *Решетников А.И., Макитас А.П.* Арктическая Гидрометеорологическая обсерватория «Тикси» // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова / Ред. В.М. Катцов, В.П. Мелешко. СПб.: Гидрометеоздат, 2012. С. 267–283.
14. *Серуенко В.И., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Никольский Н.Н., Никифоров С.Л., Саломатин А.С., Салок Р.А., Карнаух В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Чувилин Е.М., Буханов Б.А.* Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 445. № 3. С. 330–335.
15. *Шахова Н.Е., Алексеев В.А., Семилетов И.П.* Прогнозируемая эмиссия метана на Восточно-Сибирском шельфе // ДАН. 2010. Т. 430. № 4. С. 533–536.
16. *Ahmed N.* Seven facts you need to know about the Arctic methane timebomb // The Guardian. 2013. № 5 August.
17. *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.
18. *Anisimov O.A., Reneva S.A.* Permafrost and changing climate: the Russian perspective // Ambio. 2006. V. 35. № 4. P. 169–175.
19. *Conley H.M., Toland T., Kraut J., Osthagen A.* A new security architecture for the Arctic. An American perspective. Washington DC: Center for strategic and international studies, 2012. 112 p.
20. *Darby D.A.* Past glacial and interglacial conditions in the Arctic Ocean and marginal seas – a review // Progress in Oceanography. 2006. V. 71. P. 129–144.
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 // *Journ. of Geophys. Research*. 2011. V. 116. C10027. doi:10.1029/2011JC007218.
25. *Eliseev A.V., Denisov S.N., Arzhanov M.M., Mokhov I.I.* Climate-methane cycle feedback in global climate model simulations forced by RCP scenarios // *Geophys. Research Abstracts*. EGU General Assembly, 2013.
 24. *Holmes M.L., Creager Y.S.* Holocene history of the Laptev Sea Continental Shelf // *Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas*. 1974. № 3. P. 211–229.
 25. *Hugelius G., Tarnocai C., Broll G., Canadell J.G., Kuhry P., Swanson D.K.* The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions // *Earth System Science Data Discussions*. 2012. № 5. P. 707–733.
 26. *Kennett J.P., Cannariato K.G., Hendy I.L., Behl R.J.* Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials // *Science*. 2000. V. 288. P. 128–133.
 27. *Kuhry P., Ping C., Schuur E.A.G., Tarnocai C., Zimov S.A.* Report from the International Permafrost Association: carbon pools in permafrost regions // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2009. V. 20. № 2. P. 229–234.
 28. *Nikolsky D., Shakhova N.* Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: the Dmitry Laptev Strait // *Environmental Research Letters*. 2010. № 5. doi:10.1088/1748-9326/5/1/015006.
 29. *Nikolsky D.J., Romanovsky V.E., Romanovskii N.N., Kholodov A.L., Shakhova N.E., Semiletov I.P.* Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: The Laptev Sea region // *Journ. of Geophys. Research*. 2012. V. 117. F03028. doi:10.1029/2012JF002358.
 30. *Oechel W.C., Hastings S.J., Vourlitis G., Jenkins M., Richers G., Gruke N.* Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source // *Nature*. 1993. V. 361. P. 520–523.
 31. *Olefeld D., Turetsky M.R., Crill P.M., McGuire A.D.* Environmental and physical controls on northern terrestrial methane emissions across permafrost zone // *Global Change Biology*. 2013. V. 19. P. 589–603.
 32. *Petrenko V.V., Etheridge D.M., Weiss R.F., Brook E.J., Schaefer H., Severinghaus J.P., Smith A.M., Lowe D., Hua Q., Riedel K.* Methane from the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. V. 329. P. 1146–1147.
 33. *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.
 34. *Ruppel C.D.* Methane hydrates and contemporary climate change // *Nature Education Knowledge*. 2011. V. 3. № 10. P. 1–10.
 35. *Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G., Euskirchen E., Field C.B., Goryachkin S.V., Hagemann S., Kuhry P., Lafleur P.M., Lee H., Mazhitova G., Nelson F.E., Rinke A., Romanovsky V.E., Shiklomanov N., Tarnocai C., Venevsky S., Vogel J.G., Zimov S.A.* Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // *Bioscience*. 2008. V. 58. № 8. P. 701–714.
 36. *Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., Pipko I.I., Dudarev O.V.* On carbon transport and fate in the East Siberian Arctic land-shelf-atmosphere system // *Environmental Research Letters*. 2012. № 7. P. 1–13.
 37. *Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekant P., Salyuk A., Kosmach D.* Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // *Journ. of Geophys. Research*. 2010. V. 115. doi:10.1029/2009JC005602.
 38. *Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nikolsky D., Tumskoy V., Gustafsson O.* Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Geoscience*. November 2013. № 24. P. 1–7.
 39. *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. V. 327. P. 1246–1250.
 40. *Stein R.* Arctic Paleo-River Discharge (APARD) – A new research programme of the Arctic Ocean Sciences Board (AOSB). Reports on Polar Research. Alfred Wegener Institut for Polar and Marine Research. Bremerhaven, 1998. 127 p.
 41. *Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S.* Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. V. 23. GB2023. doi:10.1029/2008GB003327.
 42. *Xiong X., Barnet C.D., Maddy E.S., Gambacorta A., King T.S., Wofsy S.C.* Mid-upper tropospheric methane retrieval from IASI and its validation // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2014. V. 6. P. 2501–2531.
 43. *Xiong X., Barnet C.D., Zhuang Q., Machida T., Sweeney C., Patra P.K.* Mid-upper tropospheric methane in the high Northern Hemisphere: Spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations // *Journ. of Geophys. Research*. 2010. V. 115. doi:10.1029/2009JD013796.

Summary

We analyze data on methane concentration in the water and lower atmosphere over the shelf of the East Siberian Arctic Seas, which were obtained using marine, terrestrial, and satellite observations. Our study is targeted towards attribution of the enhanced concentrations of methane above the latitudinal-mean, which have been detected at selected locations of these seas. We compare two hypothesis, which attribute it to the effect of modern changes of the sub aquatic permafrost, and to geological factors (tectonics, presence of fault zones and paleo river beds in the study region). Our analysis showed that the methane concentration in sea water are directly related to the distance to the nearest fault zone or paleo river bed, where permafrost is absent and bottom sediments are perforated allowing methane to escape from the deep layers containing gas hydrates. This result indicate that the enhanced emission of methane, which was observed at selected locations of the shelf, is not related to the modern climate change. Earlier study, which was based on mathematical modeling, did not find intensive development of taliks as well as other processes that lead to increased gas permeability of the bottom sediments. Taken together, these results reject the hypothesis of methane catastrophe on the East Siberian Arctic Seas shelf over the foreseeable future.