

УДК 551.581

Чувствительность модели эмиссии метана с акватории морей арктического шельфа к параметризации процесса газообмена

В.В. Малахова[✉], М.В. Крайнева*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6*

Поступила в редакцию 12.02.2024;
после доработки 25.03.2024;
принята к печати 28.03.2024

Существует значительная неопределенность в отношении масштабов эмиссии метана из морей арктического шельфа. Потоки метана в этом регионе могут быть недооценены и играть значимую роль из-за большого объема газа, который содержится в донных отложениях в слое многолетнемерзлых пород и газовых гидратов. Проведен анализ чувствительности модели эмиссии метана к параметризации процессов газообмена на поверхности моря на основе результатов численного моделирования переноса растворенного метана в морях Арктики. Модель переноса растворенного метана включена в базовую модель океана и морского льда SibCIOM, разработанную в ИВМиМГ СО РАН. Оценки эмиссии метана в атмосферу выполнены на основе различных соотношений для параметризации процесса газообмена в системе «вода — атмосфера» и «вода — лед — атмосфера» с использованием данных реанализа NCEP/NCAR. Неопределенность оценки годовой эмиссии метана составила 6–12% с учетом различных зависимостей коэффициента газообмена от ветра. Более выраженное влияние при расчете потока оказывает схема учета ледового покрова — неопределенность увеличилась до 50–130%. Параметризация взаимосвязи между ледовым покровом и газообменом может оказывать большое влияние на расчетные потоки метана и приводить к недооценке его эмиссии из морей арктического шельфа.

Ключевые слова: эмиссия метана, перенос растворенного метана, газообмен, Арктика, численное моделирование; methane emission, dissolved methane transport, gas exchange, Arctic, numerical simulation.

Введение

Метан (CH_4) является важным парниковым газом для климатической системы Земли. Его концентрация в атмосфере ежегодно увеличивается [1]. Потенциальный вклад CH_4 в глобальное потепление за 100 лет примерно в 25 раз больше, чем углекислого газа. Вклад океанических источников метана (2–40 Тг/год) невелик по сравнению с наземными источниками, такими как водно-болотные угодья (153–227 Тг/год) и сельское хозяйство (178–206 Тг/год) [2], и составляет 1–13% от всех естественных выбросов. Океанические потоки метана в Арктике могут быть недооценены и играть значимую роль из-за больших объемов газа, которые находятся под морским дном в слое многолетнемерзлых пород и в зоне стабильности газовых гидратов [3, 4].

Потоки метана из морей арктического шельфа являются предметом экспериментальных и теоре-

тических исследований из-за связи с глобальным изменением климата. Данные измерений показывают усиление эмиссии метана в атмосферу Арктического региона в результате деградации и увеличения проницаемости субаквальных многолетнемерзлых пород, а также высвобождения газа из мелководных шельфовых газогидратов [5]. Оценки эмиссий метана с шельфа Северного Ледовитого океана (СЛО) в атмосферу, основанные на натурных измерениях, характеризуются значительной неопределенностью. В частности, высокая пространственная неоднородность потоков метана из донных отложений в морскую воду и далее в атмосферу в сочетании с недостаточной пространственной плотностью проводимых измерений приводит к неопределенности оценок для Восточно-Сибирского шельфа [5–8]. В литературе (см., например, [5–8]) оценки выбросов CH_4 от морей Восточно-Сибирского шельфа в атмосферу варьируются от 0 до 17 Тг/год.

Оценки эмиссии метана могут быть получены с использованием численных моделей океана [9–11], которые позволяют определить вклад различных процессов в океане, влияющих на перенос метана

* Валентина Владимировна Малахова (malax@sscc.ru);
Марина Владимировна Крайнева (krayneva.marina@sscc.ru).

из донных отложений в воду и атмосферу, а также изменчивость этих процессов во времени. При получении количественных оценок потока газа в системе «океан — атмосфера» учитывается коэффициент газообмена, который является функцией скорости ветра. В зависимости от используемой параметризации коэффициента газообмена получается разброс в оценках, приводящий к неопределенности в рассчитанном потоке порядка 10–30% [12].

Величина коэффициента газообмена в областях, покрытых морским льдом, зависит от доли открытой воды [9, 11, 13]. Предполагается, что все типы ледового покрова действуют как барьер для газообмена в течение всего года и ветер влияет на динамику поверхностного слоя воды в части, свободной ото льда так же, как и в открытом океане. На основе данных измерений в ряде работ было продемонстрировано, что взаимодействие морского льда и воды может как подавлять [14, 15], так и усиливать газообмен [13]. В работе [16] на основе данных с дрейфующей ледовой станции получено, что коэффициент газообмена имеет ненулевые значения при сплошности льда почти 100%. На основе натурных измерений и данных дистанционного зондирования [17] показана важность учета морфометрических структурных неоднородностей морского льда при моделировании взаимодействия с атмосферой. Редкие измерения в областях, покрытых льдом, и недостаточное понимание влияния морского льда на газообмен между морем и воздухом вносят большую неопределенность в модели газообмена в полярных регионах.

Цель работы — анализ чувствительности модели эмиссии метана к параметризации процессов газообмена на поверхности моря в зависимости от схемы учета скорости ветра и концентрации льда. Анализ проведен на основе численной модели SibCIOM [18] для морей арктического шельфа с учетом вклада океанических источников метана, связанных с деградацией подводной мерзлоты в период 1970–2019 гг.

1. Методы исследования

1.1. Численная модель переноса растворенного метана

Исследование основано на результатах численного моделирования переноса растворенного метана в морях Арктики. Модель переноса растворенного метана включена в базовую модель океана и морского льда SibCIOM, разработанную в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН [18, 19]. Пространственное разрешение выбрано равным $1 \times 1^\circ$, что на репроективной сетке обеспечивает сеточный шаг 30–50 км в СЛО. По вертикальной координате учитываются 38 горизонтов, при этом в поверхностном слое моря шаг сетки по вертикали составляет 5 м. Океаническая модель посредством дополнительного блока, формирующего потоки между океаном и атмосферой, взаимодействует с моделью морского льда,

в качестве которой применяется эластичная вязкопластичная модель CICE [20]. Для моделирования атмосферного воздействия на ледово-гидрологические условия СЛО и потоки метана в атмосферу используется архив данных NCEP/NCAR [21], включающий необходимый набор характеристик нижней атмосферы, скорость выпадения осадков и поступающую нисходящую длинноволновую радиацию, с пространственным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$.

Распределение растворенного метана в морской воде рассматривается как решение адвективно-диффузионного уравнения для примеси с учетом стока метана за счет его окисления [11]. Окисление метана в толще воды, учитываемое в модели, соответствует кинетике первого порядка [9, 22]. Использовалась постоянная скорость окисления, полученная на основе данных в море Бофорта, Аляска [9], которая соответствует 10^{-7} с^{-1} , или времени жизни метана примерно 100 сут.

Растворенный метан переносится океаническими течениями, для которых характерна небольшая скорость вертикального переноса от дна до поверхности. Однако при моделировании учитываются и процессы вертикальной конвекции в водном столбе, где вертикальный обмен возрастает на несколько порядков [11].

В модельном расчете для периода 1970–2019 гг. на нижней границе океана при наличии многолетнемерзлого слоя в донных отложениях шельфа задан диффузионный поток метана $30 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, соответствующий средним значениям, полученным на основе результатов измерений [5]. Средние скорости выхода метана ($3\text{--}30 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) определяются метаногенезом в сочетании с частичным высвобождением предварительно образованного газа из реликтовых гидратов, сохранившихся в мерзлоте [5, 23]. Протяженность области, где находятся источники метана, охватывает часть Баренцева и Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское моря и часть Канадского шельфа. Эта область ограничена глубиной воды 120 м. Площадь распространения субаквальной мерзлоты в донных отложениях шельфовых морей составляет $2,5 \cdot 10^6 \text{ км}^2$. Мы рассматриваем только диффузионный поток метана в толщу воды, пузырьковый выброс CH_4 из донных отложений не учитывается [11].

1.2. Поток метана в атмосферу

Расчет потока метана на границе «вода — атмосфера» проводится по методике [24], основанной на экспериментально установленных параметризациях для Мирового океана.

Поток метана в атмосферу рассчитывается по формуле

$$F = k(C_w - C_a)(1 - \varepsilon K_{ice}), \quad (1)$$

где C_w — концентрация растворенного метана в поверхностном слое воды, $\text{нмоль}/\text{л}$; C_a — равновесная с атмосферой концентрация метана, $\text{нмоль}/\text{л}$;

k — коэффициент газообмена на границе вода — воздух, см/час; K_{ice} — сплоченность льда в ячейке океанической области; ε — коэффициент для параметризации влияния льда.

Равновесная с атмосферой концентрация метана, которую имел бы атмосферный метан в морской воде при заданных температуре, солености и атмосферном давлении, рассчитывается по методике [25]. Для Арктического региона она составила от 3 до 4,5 нмоль/л. Концентрации метана в морской воде, превышающие равновесные значения, будут способствовать потоку метана в атмосферу. Скорость переноса газа между океаном и атмосферой $k = K_w(Sc/660)^{-0.5}$. Коэффициент газообмена K_w является функцией скорости ветра U (м/с) на высоте 10 м.

При вычислении числа Шмидта S используется параметризация [26]:

$$Sc = 2101,2 - (131,54(T_w - 273,15)) + (4,4931(T_w - 273,15))^2 - (0,08676(T_w - 273,15))^3 + (0,00070663(T_w - 273,15))^4, \quad (2)$$

где T_w — температура поверхностного слоя морской воды, °C.

Для количественной оценки чувствительности потока метана в атмосферу к параметризации газообмена, полученного в экспериментах (от 1 до n), мы используем коэффициент неопределенности

$$R = |\max_k F_k - \min_k F_k| / \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n F_k \right) \cdot 100\%. \quad (3)$$

2. Оценка силы связи потока метана в атмосферу с другими характеристиками модели

Предварительно проведен анализ данных расчета эмиссии метана в атмосферу из морей арктического шельфа для 1970–2019 гг. [11]. Наиболее сильные потоки получены с акватории моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря со значительным увеличением эмиссии после 2000 г. Для изучения влияния параметризации газообмена на поток метана в атмосферу используется подход для определения силы причинно-следственной связи между потоком метана и другими характеристиками модели, основанный на алгоритме [27]. Данный метод реализован в программном обеспечении с открытым исходным кодом Tigramite [27]. Процедура поиска связей и оценки их прочности делится на два этапа. На первом определяются соответствующие причинно-следственные связи для каждого временного ряда. На втором этапе оценивается сила этих связей.

Анализ связи между переменными выполнен для периода 2000–2019 гг., характерной особенностью которого является увеличение модельных потоков метана. Для анализа использовались среднемесячные данные, осредненные по акватории моря

Лаптевых и Восточно-Сибирского моря с глубиной меньше 100 м: F , T_w , K_{ice} , соленость (S), модуль скорости ветра в приземном слое (U) и толщина (H_{ice}) льда. Рассматривались мгновенные связи для лета (июнь–сентябрь) и зимы (ноябрь–май). Положительное значение силы связи означает, что при увеличении одной переменной увеличивается и связанная с ней, а отрицательное — наоборот, уменьшается.

При рассмотрении характеристик, влияющих на поток CH_4 в атмосферу из мелководной части Восточно-Сибирского шельфа, установлено, что одной из самых сильных мгновенных связей является связь с толщиной и концентрацией льда как летом, так и зимой (рис. 1, цв. вкладка). В море Лаптевых эта связь сильнее в летний период (рис. 1, в). Также в это время усиливается мгновенная связь между потоком метана и модулем скорости ветра и между потоком метана и температурой поверхностного слоя морской воды (рис. 1, в). Зимой существует обратная мгновенная связь между соленостью поверхностного слоя воды и потоком метана для обоих морей.

Таким образом, скорость ветра, температура воды и концентрация ледового покрова являются наиболее важными факторами, определяющими поток метана между океаном и атмосферой.

3. Результаты моделирования

Поток CH_4 зависит от скорости ветра через коэффициент газообмена. При оценке потока метана из океана [10, 14, 22] в соотношении (1) коэффициент газообмена на границе «вода — воздух» чаще всего задается квадратичной зависимостью от скорости ветра [24, 26]. В работе [28] установлено, что при разрушении волн и выходе пузырьков значительно увеличиваются потоки газа в атмосферу. Используя данные наблюдения GasEx-98, в [29] продемонстрировано, что увеличение K_w , связанное с выходом пузырьков, может быть описано кубической зависимостью. Влияние всех процессов на газообмен исследовалось с помощью гибридной модели [12]. Неопределенность в оценках потока метана возникает из-за неопределенностей в скорости газообмена через границу «вода — воздух», полученной из различных зависимостей от скорости ветра (рис. 2, цв. вкладка).

Для расчета K_w были использованы четыре параметризации и проведены соответствующие эксперименты F1–F4, описанные в таблице.

Описание численных экспериментов

Сценарий	K_w	ε
F1	[26]: $K_w = 0,31U^2$	1
F2	[24]: $K_w = 0,24U^2$	1
F3	[30]: $K_w = 3,3 + 0,026U^3$	1
F4	[12]: $K_w = 3 + 0,1U + 0,064U^2 + 0,011U^3$	1
F5	[26]: $K_w = 0,31U^2$	0,9

Как уже было отмечено, одной из самых сильных мгновенных связей является связь потока метана с толщиной и концентрацией льда как в летний, так и в зимний период. Действительно, морской ледовый покров играет значительную роль в цикле метана. Зимой он сильно ограничивает эмиссию газа в атмосферу, задерживая его, следовательно, увеличивается время окисления метана в морской воде. В соотношении (1) учитывается зависимость потока метана от K_{ice} в виде линейной зависимости от фракции открытой воды. С одной стороны, предполагается, что при наличии льда метан не поступает в атмосферу. С другой стороны, как показано в работе [30], наличие льда создает дополнительное перемешивание и турбулентность в открытой водной части покрытого льдом океана. Эти процессы отличаются от тех, которые возникают при той же скорости ветра, но при отсутствии льда во всей рассматриваемой области.

По аналогии с [31] мы учитываем коэффициент для параметризации влияния льда $0,9 \leq \epsilon \leq 1$. В экспериментах F1–F4 предполагается, что лед полностью блокирует газообмен между морем и атмосферой ($\epsilon = 1$), а в F5 допускаем, что через морской лед переносится до 10% газа либо лед усиливает этот процесс в части ячейки с открытой водой ($\epsilon = 0,9$) [31] (см. таблицу).

Температура воды нелинейно влияет на поток метана через число Шмидта (2), для которого в данном исследовании используется обновленная параметризация [26].

Первый численный эксперимент F1 повторяет расчет, подробно описанный в работе [11]. Рассчитанные потоки метана в атмосферу по результатам эксперимента F1 для 2007 г. представлены на рис. 3 (цв. вкладка). Несмотря на учет потоков метана из донных отложений для всей области шельфа, где деградирует мерзлота, перенос CH_4 к поверхности происходит только в районах, где в соответствии с динамикой водных масс формируется циркуляция, способствующая диффузионному и конвективному переносу метана по всей водной колонке. Часть метана накапливается в нижнем слое воды из-за устойчивой стратификации водных масс и подвергается окислению. Зимой морской лед ограничивает эмиссию газа в атмосферу. Однако открытая вода присутствует в арктическом морском льду в течение всей зимы в виде трещин и полыней, через которые газ может выходить в атмосферу.

Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений [6] подтверждает высокую изменчивость и неоднородность потоков метана на арктическом шельфе. Оценки средней эмиссии CH_4 по этим данным составили 4,6; 1,7 и 0,14 мг/(м² · сут) в летний период в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях соответственно. Измерения проведены в области среднего и внешнего шельфа глубиной более 35 м. Эти средние потоки хорошо согласуются с модельными оценками, полученными для шельфа глубиной более 35 м и представленными в настоящем исследовании (рис. 3, в).

Далее были рассчитаны интегральные потоки метана для всей области моделирования, соответствующие временному периоду от месяца до года. Суммарный поток метана в атмосферу как следствие деградации субаквальной мерзлоты в нашем исследовании составил 0,7–2,0 Тг/год (рис. 4, а, цв. вкладка). Полученная суммарная эмиссия метана в атмосферу соответствует оценкам, предложенным в [6–8]. Сокращение площади льда после 2004 г. в морях Арктики приводит к увеличению эмиссии CH_4 в атмосферу (рис. 4, а).

Неопределенность в рассчитанном потоке метана возникает из-за неопределенности как самой скорости ветра на изучаемой территории, так и из-за используемых зависимостей между скоростью ветра и скоростью переноса газа через границу «вода – воздух» (см. рис. 2). Проведено сравнение результатов, полученных в сценарных расчетах F1–F4 с различным учетом процесса газообмена. При расчете годового потока метана различия в оценках с использованием квадратичной и кубической функции незначительны и не превышают 0,03 Тг/год (см. рис. 4, а). Более низкий поток CH_4 получен по результатам F4. Различия в оценках по результатам F1 и F4 не превышают 0,14 Тг/год.

Для заданной скорости ветра применение разных соотношений K_w дает отличия в потоках метана 6–9% (см. рис. 4, б). Распределение потоков метана в атмосферу по месяцам (рис. 5, а, б, цв. вкладка) показало, что при более сильных ветрах (осенью) использование кубической зависимости (F3) дает более высокие значения. Зимой и весной более высокие значения у потоков, рассчитанных с учетом квадратичной функции в F1. Гибридная зависимость в эксперименте F4 приводит к повышению потока при $V < 3$ м/с, что характерно для июля и августа, тогда как при более сильном ветре в осенне-зимний период рассчитанный поток уменьшается по сравнению с экспериментами F1 и F3 (рис. 5, а, б). Более высокая чувствительность F к используемой параметризации газообмена характерна для осени и зимы (рис. 5, в, г). В это время неопределенность в оценках может составить 15–28%, что, прежде всего, связано с усилением скорости ветра. Таким образом, при средней скорости ветра (4–6 м/с для региона по данным реанализа NCEP/NCAR) различия в оценках годового потока метана с использованием описанных функций незначительны и ограничены коэффициентом неопределенности $R \leq 8\%$.

В эксперименте F5 предполагается, что лед блокирует поток не полностью, а на 90%. Такой подход привел к росту годовой эмиссии метана примерно в 1,5 раза (см. рис. 4, а). Оценка суммарного потока метана в атмосферу в результате деградации субаквальной мерзлоты составила 1,6–2,9 Тг/год (см. рис. 4, а). Следовательно, увеличилась и неопределенность в полученных оценках до 50–130% (см. рис. 4, б). Сокращение ледового покрова последние два десятилетия способствует росту потока метана и снижению неопределенности,

как и показано в экспериментах F1–F4. Распределение потока газа по месяцам (см. рис. 5, а) демонстрирует значимое увеличение эмиссии, полученной в F5, в зимние и осенние месяцы. В свою очередь, это приводит к снижению потока CH_4 летом. Действительно, усиление конвективного перемешивания, которое начинается осенью, приводит к росту концентрации CH_4 в верхнем слое воды. Формирование ледового покрова блокирует выход газа в атмосферу. Увеличение газообмена в покрытых льдом областях приводит к значительному выбросу газа в зимние месяцы как следствие высоких концентраций метана подо льдом и усиления ветрового воздействия. Это хорошо согласуется с натурными данными. Великая Сибирская полынья, которая остается открытой на границе раздела «суша – припай» в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море, рассматривается как основной путь выхода CH_4 в атмосферу зимой [5].

Заключение

Полученные пространственные распределения потока CH_4 в атмосферу показывают, что основной выход метана происходит из мелководной части арктического шельфа. Суммарный поток метана в атмосферу вследствие деградации субаквальной мерзлоты составил 0,7–2,9 Тг/год, что лежит в диапазоне имеющихся оценок [5–8]. Сокращение площади льда в морях Арктики приводит к росту количества метана, который может выйти в атмосферу в осенние и зимние месяцы. В результате получено устойчивое увеличение эмиссии CH_4 в зимний период (начиная с 2004 г.) по причине сокращения ледового покрова.

Выяснено, что при средней скорости ветра 4–6 м/с для данного региона различия в оценках с использованием описанных зависимостей незначительны. При оценке эмиссий метана для каждого месяца неопределенность, связанная с различными параметризациями коэффициента газообмена, может достигать более 20% для осени и зимы вследствие усиления скорости ветра. Однако различия в рассчитанных годовых потоках метана для всей области шельфа составили 8%, или 0,09 Тг/год.

Дополнительный эксперимент с усилением газообмена в области, покрытой льдом на 10%, показал, что эмиссия метана может значительно увеличиться. Годовой поток метана в атмосферу вырос с 0,7–2,0 до 1,6–2,9 Тг/год за счет роста выброса газа в зимние и осенние месяцы. Неопределенность оценки годового потока метана при различных схемах учета ледового покрова составила 50–130%.

Взаимосвязь между ледовым покровом и газообменом в покрытых льдом регионах может оказывать большое влияние на расчетные потоки CH_4 и приводить к недооценке потока метана из морей арктического шельфа [11]. Для уменьшения неопределенности, связанной с недостаточным пониманием учета коэффициента газообмена в областях,

покрытых льдом, необходимы наборы данных о потоках газа в этих регионах.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 20-11-20112).

Список литературы

1. *Etminan M., Myhre G., Highwood E., Shine K.* Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 12614–12623. DOI: 10.1002/2016GL071930.
2. *Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunoy M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L.* Three decades of global methane sources and sinks // *Nat. Geosci.* 2013. V. 6. P. 813–823. DOI: 10.1038/ngeo1955.
3. *Ruppel C.D., Kessler J.D.* The interaction of climate change and methane hydrates // *Rev. Geophys.* 2017. V. 55. P. 126–168. DOI: 10.1002/2016RG000534.
4. *Malakhova V.V.* The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes // *IOP Conf.: Earth Environ. Sci.* 2020. V. 606. P. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012035.
5. *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O.* The East Siberian Arctic shelf: Towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Phil. Trans. Royal Soc. A: Math., Phys., Eng. Sci.* 2015. V. 373, N 2052. P. 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
6. *Thornton B.F., Geibel M.C., Crill P.M., Humborg C., Mörth C.-M.* Methane fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 5869–5877. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
7. *Berchet A., Bousquet P., Pison I., Locatelli R., Chevallier F., Paris J.-D., Dlugokencky E.J., Laurila T., Hatakka J., Viisanen Y., Worthy D.E.J., Nisbet E.G., Fisher R., France J., Lowry D., Ivakhov V., Hermansen O.* Atmospheric constraints on the methane emissions from the East Siberian Shelf // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 6. P. 4147–4157. DOI: 10.5194/acp-16-4147-2016.
8. *Tohjima Y., Zeng J., Shirai T., Niwa Y., Ishidoya S., Taketani F., Sasano D., Kosugi N., Kameyama S., Takashima H., Nara H., Morimoto S.* Estimation of CH_4 emissions from the East Siberian Arctic shelf based on atmospheric observations aboard the R/V Mirai during fall cruises from 2012 to 2017 // *Polar Sci.* 2020. P. 100571. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100571.
9. *Wehlström I., Meier H.E.M.* A model sensitivity study for the sea–air exchange of methane in the Laptev Sea, Arctic Ocean // *Tellus B.* 2014. V. 66. DOI: 10.3402/tellusb.v66.24174.
10. *Малахова В.В., Голубева Е.Н.* О возможной эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 6. С. 452–458.
11. *Malakhova V., Golubeva E.* Model study of the effects of climate change on the methane emissions on the

- Arctic shelves // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 274. DOI: 10.3390/atmos13020274.
12. Wanninkhof R., Asher W.E., Ho D.T., Sweeney C., McGillis W.R. Advances in quantifying air–sea gas exchange and environmental forcing // *Ann. Rev. Marine Sci.* 2009. V. 1. P. 213–244. DOI: 10.1146/annurev.marine.010908.163742.
 13. Loose B., McGillis W.R., Perovich D., Zapp C.J., Schlosser P. A parameter model of gas exchange for the seasonal sea ice zone // *Ocean Sci.* 2014. V. 10, N 1. P. 17–28. DOI: 10.5194/os-10-17-2014.
 14. Bigdeli A., Hara T., Loose B., Nguyen A.T. Wave attenuation and gas exchange velocity in Marginal sea ice zone // *J. Geophys. Res.: Ocean.* 2018. V. 123, N 3. P. 2293–2304. DOI: 10.1002/2017JC013380.
 15. Rutgers van der Loeff M.M., Cassar N., Nicolaus M., Rabe B., Stimac I. The influence of sea ice cover on air–sea gas exchange estimated with radon-222 profiles // *J. Geophys. Res.: Ocean.* 2014. V. 119, N 5. P. 2735–2751. DOI: 10.1002/2013JC009321.
 16. Loose B., Schlosser P., Perovich D., Ringelberg D., Ho D.T., Takahashi T., Richter-Menge J., Reynolds C.M., McGillis W.R., Tison J.-L. Gas diffusion through columnar laboratory sea ice: Implications for mixed-layer ventilation of CO₂ in the seasonal ice zone // *Tellus B.* 2011. V. 63. P. 23–39. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00506.x.
 17. Репина И.А., Артамонов А.Ю. Морфометрические неоднородности морского льда по данным дистанционного зондирования и наземных измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19, № 6. С. 205–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-205-221.
 18. Голубева Е.Н. Численное моделирование динамики атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // *Вычислительные технологии*. 2008. Т. 13, № 5. С. 11–24
 19. Platov G.A., Golubeva E.N., Kraineva M.V., Malakhova V.V. Modeling of climate tendencies in Arctic seas based on atmospheric forcing EOF decomposition // *Ocean Dyn.* 2019. V. 69, N 6. P. 747–767. DOI: 10.1007/s10236-019-01259-1.
 20. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // *J. Phys. Oceanography*. 1997. V. 27. P. 1849–1867. DOI: 10.1175/1520-0485(1997)027<1849:AEVPMF>2.0.CO;2.
 21. Large W., Yeager S. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies // *NCAR Technical Note: NCAR/TN-460+STR*. CGD Division of the National Center for Atmospheric Research. 2004. 105 p. DOI: 10.5065/D6KK98Q6.
 22. Mau S., Gentz T., Körber J.-H., Torres M.E., Römer M., Sahling H., Wintersteller P., Martinez R., Schlüter M., Helmke E. Seasonal methane accumulation and release from a gas emission site in the central North Sea // *Biogeosci.* 2015. V. 12. P. 5261–5276. DOI: 10.5194/bg-12-5261-2015.
 23. Malakhova V.V., Eliseev A.V. Subsea permafrost and associated methane hydrate stability zone: How long can they survive in the future? // *Theor. Appl. Climatol.* 2024. V. 155. P. 3329–3346. DOI: 10.1007/s00704-023-04804-7.
 24. Wanninkhof R. Relationship between wind-speed and gas-exchange over the ocean // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 7373–7382. DOI: 10.5281/zenodo.5728529.
 25. Wiesenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water // *J. Chem. Eng. Data*. 1979. V. 24, N 4. P. 356–360. DOI: 10.1021/je60083a006.
 26. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // *Limnol. Oceanogr.-Meth.* 2014. V. 12. P. 351–362. DOI: 10.1021/je60083a006.
 27. Runge J., Nowack P., Kretschmer M., Flaxman S., Sejdinovic D. Detecting and quantifying causal associations in large nonlinear time series datasets // *Sci. Adv.* 2019. V. 5, eaau4996. DOI: 10.1126/sciadv.aau4996.
 28. Zhang W., Perrie W., Vagle S. Impacts of winter storms on air–sea gas exchange // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. P. L14803. DOI: 10.1029/2005GL025257.
 29. McGillis W.R., Edson J.B., Hare J.E., Fairall C.W. Direct covariance of air–sea CO₂ fluxes // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 16729–16745. DOI: 10.1029/2000JC000506.
 30. Loose B., Kelly R.P., Bigdeli A., Williams W., Krishfield R., Rutgers van der Loeff M., Moran S.B. How well does wind speed predict air–sea gas transfer in the sea ice zone? A synthesis of radon deficit profiles in the upper water column of the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2017. V. 122, N 5. P. 3696–3714. DOI: 10.1002/2016JC012460.
 31. Weber T., Wiseman N.A., Kock A. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 4584. DOI: 10.1038/s41467-019-12541-7.

V.V. Malakhova, M.V. Kraineva. Sensitivity of the model of methane emission from the Arctic shelf seas to the parameterization of the gas exchange process.

There is considerable uncertainty about the methane emission from the Arctic shelf seas. Methane fluxes in this region can be underestimated and play a significant role due to the large volume of gas contained in bottom sediments in the permafrost and gas hydrates. We have analyzed the model sensitivity to the parameterization of gas exchange processes on the sea surface. The study is based on the numerical modeling results of the transport of dissolved methane in the seas of the Arctic. The dissolved methane transport model is included in the basic model of the ocean and sea ice developed at the Institute of Computational Mathematics and Mathematics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. Estimates of methane emissions into the atmosphere were made with various parameterization of the gas exchange process in the "water–atmosphere" and "water–ice–atmosphere" systems using NCEP/NCAR reanalysis data. The uncertainty of the estimate of annual methane emission amounted to 6–12% when considering different dependencies of gas exchange on wind. The scheme accounting the ice cover has a more pronounced influence on the flux: the uncertainty increased to 50–130%. Parameterization of the relationship between ice cover and gas exchange can have a great influence on the calculated methane fluxes and lead to underestimation of its emission from the seas of the Arctic shelf.

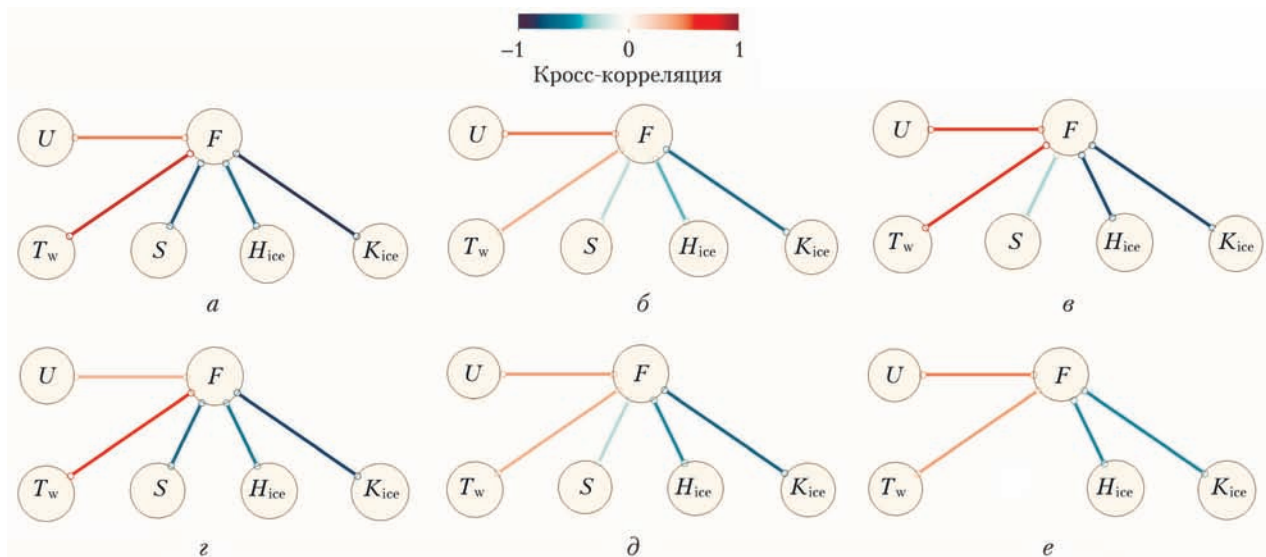


Рис. 1. Сила связи потока метана, рассчитанная для моря Лаптевых (*a–в*) и Восточно-Сибирского моря (*з–е*): за весь год (*a, з*); октябрь – май (*б, д*); июнь – сентябрь (*в, е*)

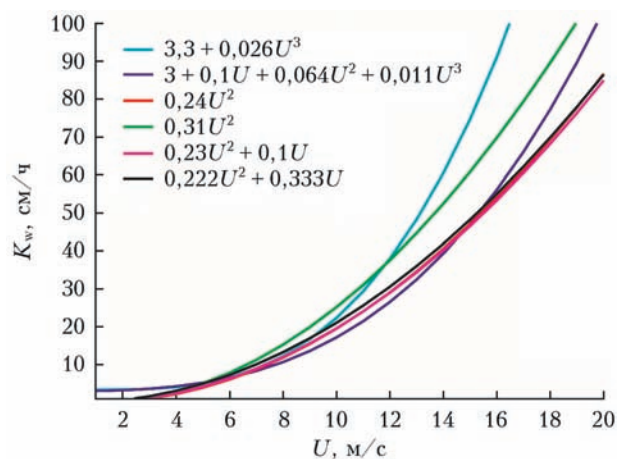


Рис. 2. Зависимости коэффициента газообмена от скорости ветра

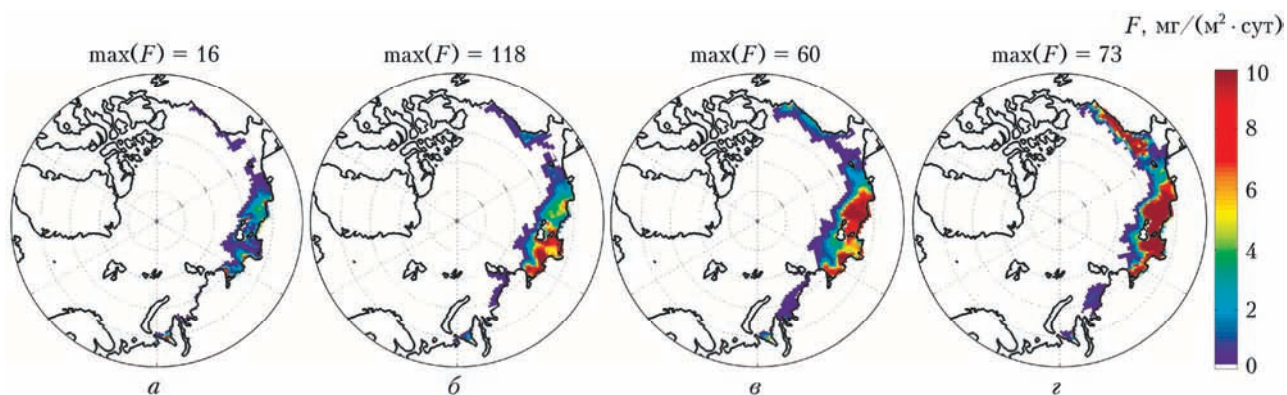


Рис. 3. Пространственное распределение потока метана в атмосферу, полученное в численном эксперименте F1 для марта (*a*); мая (*б*); июля (*в*); октября (*з*) 2007 г.

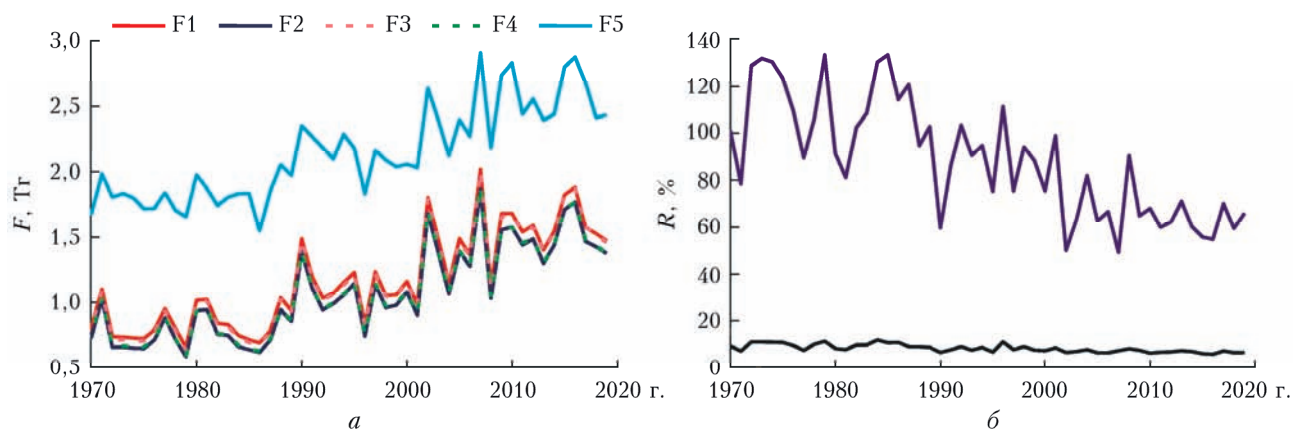


Рис. 4. Изменения во времени: *a* — годового потока метана в атмосферу, суммированного по всей области, полученного в численных экспериментах F1–F5; *б* — неопределенности оценки потока, рассчитанного по (3) для экспериментов F1–F5 (синяя кривая) и F1–F4 (черная кривая)

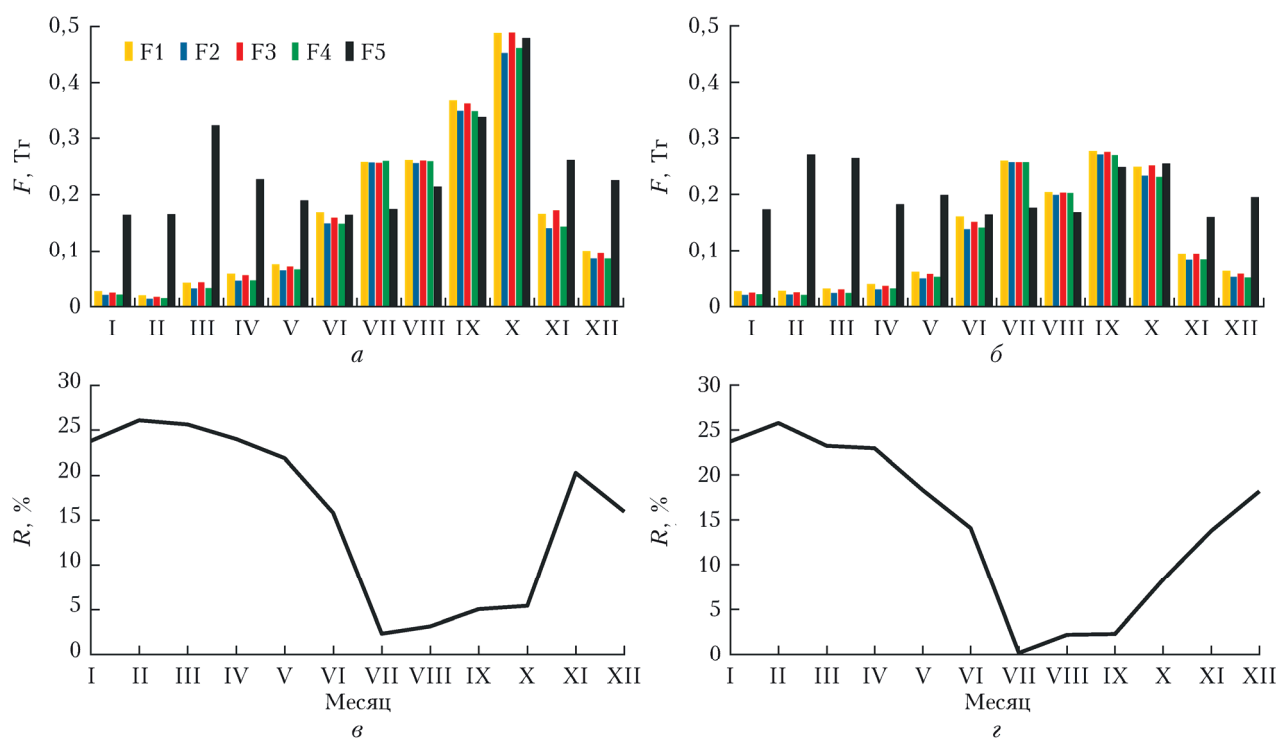


Рис. 5. Поток метана из океана в атмосферу, рассчитанный для 2007 (*a*) и 2019 гг. (*б*) по месяцам в численных экспериментах F1–F5; неопределенность оценки потока для экспериментов F1–F4 в 2007 (*в*) и 2019 гг. (*г*)