

УДК 551.510.411.2

Атмосферная концентрация и потоки метана на Западно-Арктическом шельфе Евразии в позднеосенний период 2023 года: судовые наблюдения и численное моделирование

Ю.А. Штабкин^{✉1}, К.Б. Моисеенко¹, И.Б. Беликов¹,
В.А. Белоусов¹, А.В. Васильева¹, Н.С. Кириллова¹,
Д.А. Пестунов², Б.Д. Белан², М.Д. Кравчишина^{3*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зueva, 1

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36

Поступила в редакцию 24.03.2026;

после доработки 08.05.2026;

принята к печати 10.05.2026

Оценка эмиссий метана с поверхности арктических шельфовых морей остается одной из наименее изученных проблем при исследовании глобального баланса парниковых газов из-за крайней разреженности сети наблюдений в высоких широтах. Представлены результаты непрерывных судовых измерений концентраций CH_4 и CO_2 в приводном слое атмосферы Карского и Баренцева морей в ходе 93-го рейса научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» 8.11–7.12.2023 г. Для эпизодов с повышенным содержанием метана (>2050 ppb) построены обратные траектории воздушных масс и сопоставлены натурные данные с расчетами региональной модели WRF-Chem, что позволило пространственно локализовать источники и количественно оценить потоки на границе «вода – атмосфера». Максимальные эмиссии (с медианным и пиковым значениями 55,5 и 363 мкг/(м² · ч) соответственно и ростом приводной концентрации до 2118 ppb) приурочены к юго-западной части Карского моря (Байдарацкая губа), что качественно согласуется с прямыми камерными измерениями (86,4 и 483 мкг/(м² · ч)). Полученные величины сопоставимы или превышают зимние потоки из тундровых и заболоченных экосистем Западной Сибири в холодный период (40–270 мкг/(м² · ч)), что свидетельствует о потенциально значимом вкладе шельфовых эмиссий в региональный атмосферный баланс метана. Предложенный подход к восстановлению потоков по данным приводных концентраций может быть применен для регионализации точечных измерений и уточнения оценок в других районах Арктики в условиях ограниченности данных наблюдений.

Ключевые слова: состав атмосферы, судовые наблюдения, Арктика, эмиссии метана, обратные траектории, численное моделирование, количественные оценки; atmospheric composition, shipborne measurements, Arctic, methane emission, backward trajectory, model simulation, numerical assessment.

Введение

Измерения концентрации метана в приповерхностном слое в полярных широтах являются важной составляющей глобального мониторинга состава

атмосферы. Подобные наблюдения имеют высокую научную значимость для оценки потоков парниковых газов на границе «атмосфера – подстилающая поверхность» и баланса тропосферного метана. Наблюдаемое на протяжении последних десятилетий потепление климата, наиболее выраженное в высоких широтах [1], сопровождается ростом эмиссий метана в криолитозоне. Это происходит за счет увеличения глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых грунтов [2–5], активации термокарста [6, 7], биогенной продукции и высвобождения растворенного и пузырькового метана из донных осадков мелководных шлейфов [8, 9] и термодиссоциации газовых гидратов в ходе деградации подводной мерзлоты [10, 11]. Оценкам вклада региональных

* Юрий Александрович Штабкин (yuryshtabkin@gmail.com, shtabkin@ifaran.ru); Константин Борисович Моисеенко (konst.dvina@gmail.com); Игорь Борисович Беликов (belikov@ifaran.ru); Валерий Анатольевич Белоусов (belousov@ifaran.ru); Анастасия Васильевна Васильева (vivechar@gmail.com); Наталья Сергеевна Кириллова (n.kirillova65@gmail.com); Дмитрий Александрович Пестунов (pest@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Марина Даниловна Кравчишина (kravchishina@ocean.ru).

эмиссий из наземных экосистем в глобальный баланс метана посвящено значительное количество модельных и экспериментальных работ [см. 12–16 и ссылки выше].

Вопрос об эмиссии метана с поверхности шельфовых морей и роли данного процесса в глобальном балансе атмосферного метана изучен значительно слабее, что отчасти связано с нехваткой стационарных измерительных пунктов в Арктике. В этой связи особую актуальность приобретают данные морских экспедиций [17–20] и прямые измерения потоков с морской поверхности [21–23]. Значительный объем данных о приводном содержании метана над акваториями арктических морей Евразии был собран в 2015–2024 гг. в ходе экспедиций на НИС «Академик Мстислав Келдыш» [20, 24]. Исследования проводились в рамках программ Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН «Экосистемы морей Сибирской Арктики» и «Европейская Арктика: геологическая летопись изменения окружающей среды и климата».

Характерной особенностью полученных рядов концентраций является наличие как долгопериодных (с характерными временами порядка нескольких часов — суток), так и мезомасштабных (десяtkи минут — часы) составляющих полного измеренного сигнала. Существование синоптической (долгопериодной) компоненты обусловлено, по-видимому, региональной адвекцией воздуха с континента от регионов-источников метана [24], тогда как мезомасштабные флуктуации могут свидетельствовать о вкладе не учитываемых локальных эмиссий метана с водной поверхности в условиях значительной временной изменчивости атмосферного переноса и пространственной неоднородности источников. Количественные оценки подобных эмиссий представляют большой интерес ввиду потенциально высокой значимости региона как атмосферного источника парниковых газов.

В ходе 93-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК-93) [25] в ноябре–декабре 2023 г. впервые были проведены синхронные измерения концентраций метана в приводном слое над Баренцевым и Карским морями, а также его потоков на границе «вода — атмосфера». Такой комплексный подход позволяет сопоставить результаты прямых измерений с независимыми оценками, полученными с использованием региональной модели атмосферного переноса при задании реалистичных начальных и граничных условий. В данной работе мезомасштабная (с горизонтальными размерами расчетной области $\sim 1000 \times 2000$ км) задача восстановления атмосферных эмиссий метана по всему маршруту экспедиции решается численно с привлечением региональной атмосферной модели WRF-Chem (конфигурация GHG (greenhouse gases)) и доступной информации о континентальных эмиссиях и крупномасштабном распределении метана в тропосфере.

Учитывая неопределенности в расчетах вертикального турбулентного переноса и задании континентальных эмиссий метана в районе исследований, полученные модельные оценки потоков с мор-

ского шельфа в отдельных измерительных пунктах следует рассматривать как ориентировочные или близкие к реальным величинам. Тем не менее средний по району наблюдений модельный поток метана удовлетворительно согласуется с инструментальными данными.

Цель настоящей работы — количественная оценка потоков метана на границе «вода — атмосфера» на Западно-Арктическом шельфе Евразии в позднесенный период 2023 г. на основе непрерывных судовых измерений приводной концентрации метана, прямых камерных измерений его потоков и численного моделирования с использованием региональной химико-динамической модели WRF-Chem. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- идентификация эпизодов повышенного содержания метана и их связи с адвекцией воздушных масс с континента или локальными морскими источниками;
- пространственная локализация районов наиболее интенсивных эмиссий;
- восстановление величин потоков метана с морской поверхности вдоль судовой трассы и их сопоставление с независимыми инструментальными измерениями камерным методом.

Материалы и методы

Судовые измерения приводного содержания и потоков метана

Измерения концентраций метана (CH_4) и углекислого газа (CO_2) проводились с помощью автоматизированного приборного комплекса (АПК) на основе газоанализатора G2132-i Picarro Inc. (США). Воздухозаборник был установлен на палубе ходовой рубки на высоте 18,5 м н.у.м. (рис. 1). От воздухозаборника по 10-метровому трубопроводу воздух поступал к газоанализатору, размещенному в лабораторном помещении, оборудованном в лоцманской каюте на той же палубе. Данный прибор позволяет измерять концентрацию метана в диапазоне от 1800 до 12000 ppb (погрешность менее 5 ppb) и концентрацию CO_2 в диапазоне от 200 до 2000 ppm (погрешность менее 1 ppm). Время единичного отсчета прибора для CH_4 и CO_2 составляет ~ 2 с. Подробное описание АПК приводится в [20, 26]. Измерительный комплекс работал в непрерывном режиме 8.11–7.12.2023 г.

Газоанализатор G2132-i в процессе эксплуатации был откалиброван с помощью вторичного эталона, в качестве которого использовался баллон со сжатым воздухом, предоставленный Норвежским институтом исследований воздуха (Norsk Institutt for Luftforskning, NILU, www.nilu.no). Концентрации CH_4 и CO_2 в баллоне были измерены в NILU с относительной погрешностью, не превышающей 0,03% для CH_4 и 0,25% для CO_2 , по первичному эталону. После определения калибровочного коэффициента прибора последний был использован для расчета концентраций CH_4 и CO_2 в поверочных газовых смесях (ПГС) компании Linde Gas Rus (Россия)

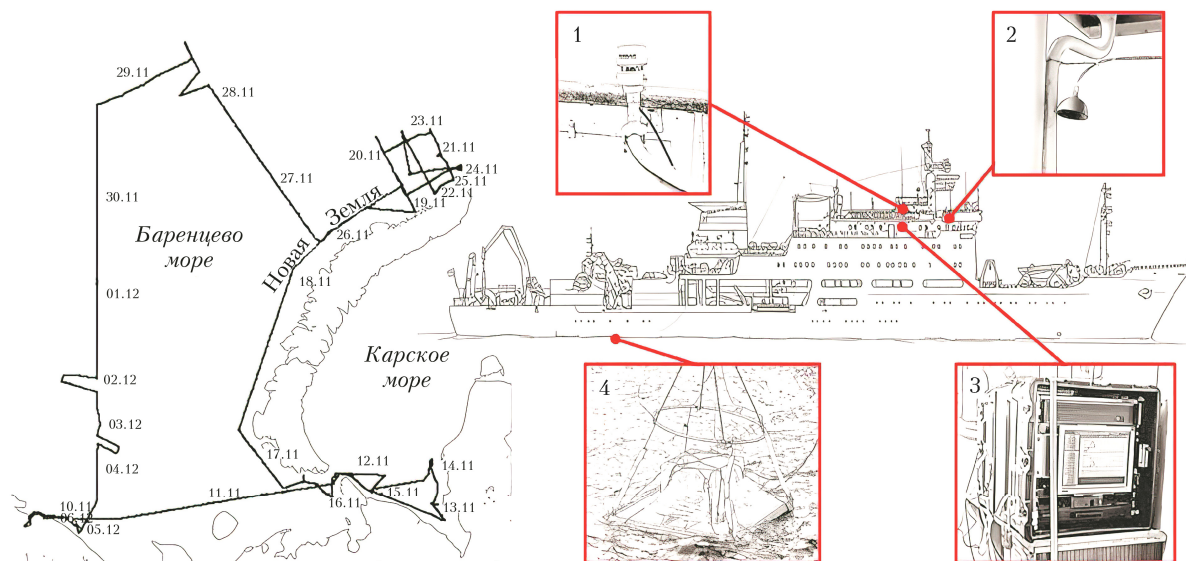


Рис. 1. Маршрут экспедиции и схема расположения приборов на судне: 1 — метеостанция Airmar 150WX; 2 — воздухозаборник приборного комплекса; 3 — прибор Picarro G2132-i; 4 — камера для измерения потоков метана (см. цветные рисунки на сайте <http://ao.iao.ru/ru/content/vol.39-2026/iss.09>)

с погрешностью $\approx 0,05\%$, т.е. существенно лучшей, чем у самих ПГС (до 5%). Эти ПГС были использованы для исследования долговременной стабильности показаний прибора, которое показало, что при многократных калибровках с периодом в несколько месяцев на протяжении более трех лет различие в показаниях не превышает 5 ppb, что соответствует характеристикам, заявленным компанией-производителем. Метеопараметры фиксировались станцией Airmar 150WX (США), установленной на пеленгаторной палубе над ходовой рубкой.

Измеренные концентрации CO_2 использовались для идентификации артефактов, вызванных спорадическим попаданием в воздухозаборник газоанализатора выхлопных газов судовых двигателей и котлов, а также воздуха, загрязненного продуктами сгорания при утилизации отходов на корме судна. Подобные эпизоды, проявившиеся в форме сильных кратковременных флуктуаций концентраций CO_2 и CH_4 длительностью $< 1\text{--}5$ мин, отфильтровывались по 99-му и 80-му процентилям концентраций CH_4 и CO_2 в окне ± 12 ч. (В процедуре первичного контроля данных учитывалось также направление ветра относительно дымовой трубы судна.) Заполненность итоговых рядов минутных концентраций CH_4 и CO_2 составляет $\sim 86\%$ от общего времени наблюдений.

Потоки CH_4 и CO_2 с поверхности воды измерялись камерным методом [27]. Во время остановок судна в заданных пунктах (измерительных станциях) на поверхность воды размещалась камера объемом ~ 60 л и площадью покрываемой поверхности $0,16\text{ м}^2$, жестко закрепленная в центре поплавка размером $0,9 \times 0,9$ м. Концентрации CO_2 и CH_4 в камере изначально соответствуют атмосферным значениям, которые устанавливаются при ее проветривании в подвешенном над водой положении. После спуска камеры на воду в ней происходит

газообмен, сопровождаемый ростом (уменьшением) парциального давления в камере при эмиссии (поглощении) газа с водной поверхности. Концентрации CO_2 и CH_4 в воздухе камеры непрерывно регистрировались с помощью газоанализатора Picarro G4301 GasScouter, установленного в судовой лаборатории, на протяжении 5–40 мин в зависимости от скорости изменения. Зная исходную атмосферную концентрацию газов, объем камеры, площадь измеряемой поверхности и скорость увеличения или снижения концентрации каждого из газов в воздухе камеры, вычислялись значения потоков [28, 29]. В настоящей работе использовались только данные о потоках метана.

Модель WRF-Chem

Для расчетов приводной концентрации CH_4 применялась региональная химико-динамическая модель WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model with Chemistry) версии 4.4.1 в режиме расчета трассеров (WRF-GHG). Опция GHG (greenhouse gases) позволяет моделировать трехмерные поля концентраций $[\text{CO}]$, $[\text{CH}_4]$ и $[\text{CO}_2]$ без учета химических превращений, сохраняя при этом атмосферный динамический блок (WRF-ARW) идентичным базовой версии модели с химическим модулем (подробное описание см. в [30–32] и на сайте www.mmm.ucar.edu/models/wrf).

Расчеты проводились для прямоугольной области (в цилиндрической проекции Меркатора) с горизонтальными размерами 2000×800 км (примерно $33\text{--}85^\circ$ в.д., $66,2\text{--}73,2^\circ$ с.ш.), включающей район проведения измерений (Баренцево и Карское моря) и часть прилегающей суши — в основном тундровые и лесотундровые районы Европейской России (рис. 2). Использовалась конечно-разностная сетка из $100 \times 40 \times 49$ узлов с размером ячейки $\Delta = 20$ км

вдоль горизонтальных осей и переменным шагом по вертикали, монотонно возрастающим от 45 м вблизи нижней границы до 800 м в верхней тропосфере и ~1,5 км вблизи верхней границы на высоте около 30 км.

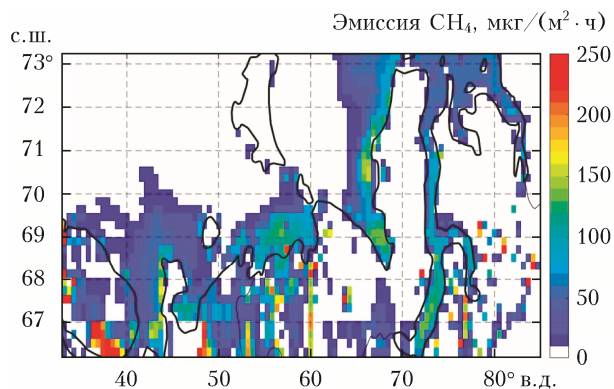


Рис. 2. Расчетный домен и априорные (морские и континентальные) эмиссии метана, используемые в WRF-Chem

Для постановки начальных и граничных условий для метеополей использовались данные реанализа NCEP. Начальные и граничные поля $[\text{CH}_4]$ задавались с использованием результатов расчетов по глобальной химико-климатической модели WACCM [33] на сетке $1^\circ \times 1^\circ$. В расчетах использовались стандартные настройки WRF-GHG, включающие параметризацию вертикального и горизонтального турбулентного обмена теплом и импульсом, конвективного переноса и процессов на границе «атмосфера – подстилающая поверхность» (подробнее см. https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/).

Для задания эмиссий метана в выбранной расчетной области использовалась глобальная инвентаризация антропогенных выбросов EDGAR2024 [34] (разрешение $0,1^\circ \times 0,1^\circ$), данные о потоках метана с переувлажненных территорий WetCharts 1.3.1 [35] ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$), а также оценки эмиссии с поверхности моря согласно [21] ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$). Данные были репроецированы на расчетную сетку модели (рис. 2). При обработке массива EDGAR2024 экстремально высокие (на несколько порядков превышающие средние значения по области) значения выбросов метана в районе Варандейского нефтяного терминала и нефтедобывающей морской ледостойкой стационарной платформы «Приразломная» в Печорском море были исключены как заведомо нереалистичные. Средний поток CH_4 (отношение суммарной эмиссии к площади расчетной области) от всех региональных источников, морских и континентальных, составил $24 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Это сопоставимо с величиной среднегодового потока метана из влажных и пресноводных экосистем России ($65,2 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) [36] и укладывается в диапазон экспериментальных данных ($40\text{--}270 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$), полученных в холодный период года в Большеземельской тундре и на заболоченных территориях Западной Сибири [37].

Для количественной оценки потоков метана с морской поверхности и их вклада в измеренные концентрации были проведены расчеты по трем эмиссионным сценариям: E0 – при «выключенных» эмиссиях метана внутри расчетной области; EK – при задании континентальных (EDGAR, WetCharts) и априорных морских эмиссий; ЕКМ – аналогично ЕК, но с использованием рассчитанных эмиссий с поверхности моря. Во всех расчетах использовались идентичные граничные и начальные условия, а поля континентальных и морских эмиссий метана полагались неизменными во времени на протяжении всего периода экспедиционных наблюдений. Для анализа применялись средние часовые поля концентраций в слое от 0 до ~45 м (первый расчетный уровень модели WRF, верхняя граница которого варьируется из-за специфики вертикальной координаты). Полученные из наблюдений средние часовые концентрации и потоки метана сравнивались с аналогичными модельными величинами в ячейках, ближайших к точке расположения судна в моменты осреднения и отбора проб.

Количественные оценки потоков метана

Учитывая, что измерения проводились вдоль судовой трассы в течение ограниченного времени, простейшим способом восстановления потоков метана на границе «вода – атмосфера» является расчет «эквивалентных» эмиссий непосредственно вдоль судовой трассы, наилучшим образом согласующихся с измеренными концентрациями. Данный подход базируется на допущении, что вкладом морских эмиссий на временах адвекции, превышающих характерное время вертикального переноса в приводном слое, можно пренебречь. Такое упрощение оправдано на фоне других неопределенностей, обусловленных неполнотой информации об условиях переноса в нижних слоях атмосферного пограничного слоя над морской поверхностью, а также погрешностями при определении континентальных источников эмиссий метана и граничных условий.

Расчет потоков метана выполнялся итерационным методом. На первом шаге задавались единичные эмиссии ($1 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) в пересекаемых трассой судна ячейках расчетной сетки, в которых измеренные концентрации CH_4 ($^{\text{obs}}[\text{CH}_4]$) превосходят расчетные в сценарии EK ($^0[\text{CH}_4]$). На последующих шагах эти значения умножались на коэффициент λ , рассчитываемый для i -й ячейки по формуле

$$\lambda_i = |^{\text{obs}}[\text{CH}_4]_i - ^{\text{clc}}[\text{CH}_4]_i| / ^{\text{sea}}[\text{CH}_4]_i,$$

где $^{\text{clc}}[\text{CH}_4]_i$ – рассчитанные на данном шаге концентрации по сценарию ЕКМ; $^{\text{sea}}[\text{CH}_4]_i$ ($= ^{\text{clc}}[\text{CH}_4]_i - ^0[\text{CH}_4]_i$) – вклад оцениваемых эмиссий в приводное содержание CH_4 . В качестве критерия сходимости использовался коэффициент корреляции R между множествами измеренных и рассчитанных концентраций. При достижении определенного числа итераций значение R стабилизировалось. Ниже

приводятся результаты расчетов, полученных на 18-м шаге, начиная с которого величина R менялась незначительно (рис. 3).

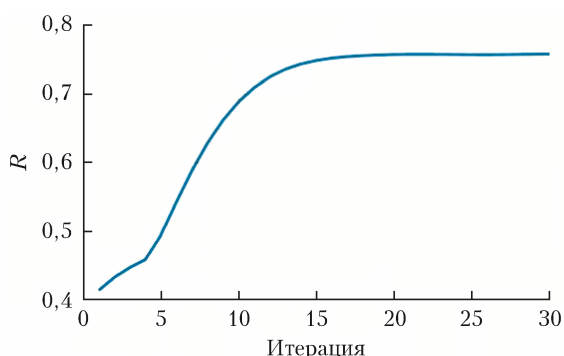


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции между модельными и измеренными концентрациями CH_4 от порядкового номера итерации при восстановлении величин потоков

Результаты и обсуждение

Согласно рис. 4 высокие (> 2050 ppb) приводные концентрации метана отмечались при южном или юго-западном направлениях ветра вблизи Бай-дарацкой губы Карского моря (11–12 ноября), возле северной оконечности Новой Земли (24, 26–27 ноября) и вдоль разреза по 39° в.д. в Баренцевом море с 29 ноября по 4 декабря 2023 г. (эпизод 5) (см. рис. 1). Всего было зарегистрировано пять эпизодов продолжительностью от одного до трех дней каждый.

Расчеты обратных 72-часовых траекторий по модели [38] показывают, что значительную часть времени судно находилось в зоне адвекции воздушных масс с континента. Ансамбли траекторий для отдельных эпизодов высокого содержания метана (отмечены на рис. 4 соответствующим номером) представлены на рис. 5. Видно, что пиковые значения $[\text{CH}_4]$ для эпизодов 2–5 могут быть вызваны

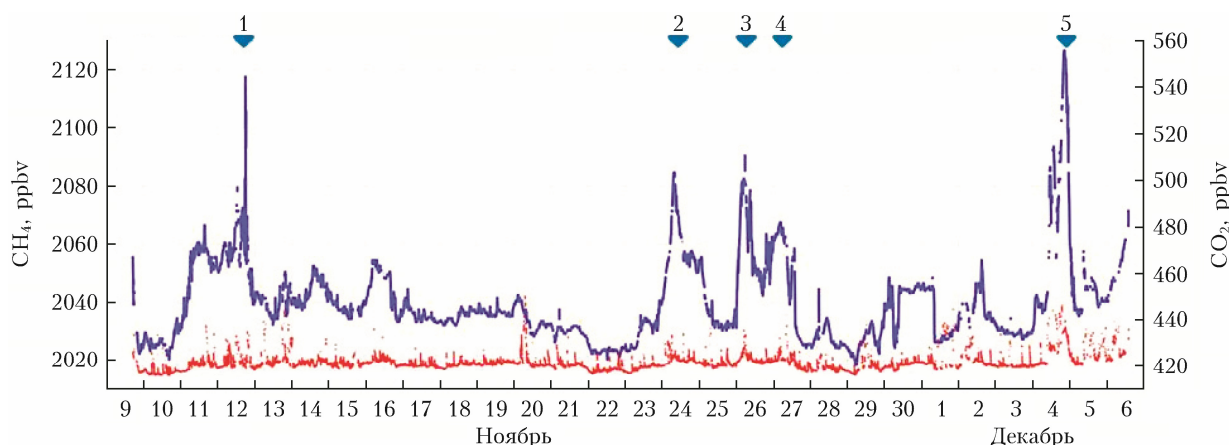


Рис. 4. Отфильтрованные (минутные) значения концентраций CH_4 (синяя кривая) и CO_2 (красная кривая) в приводном слое воздуха по данным судовых измерений; штрихи по оси абсцисс соответствуют 00:00 каждых суток; цифрами 1–5 обозначены эпизоды повышенных концентраций метана

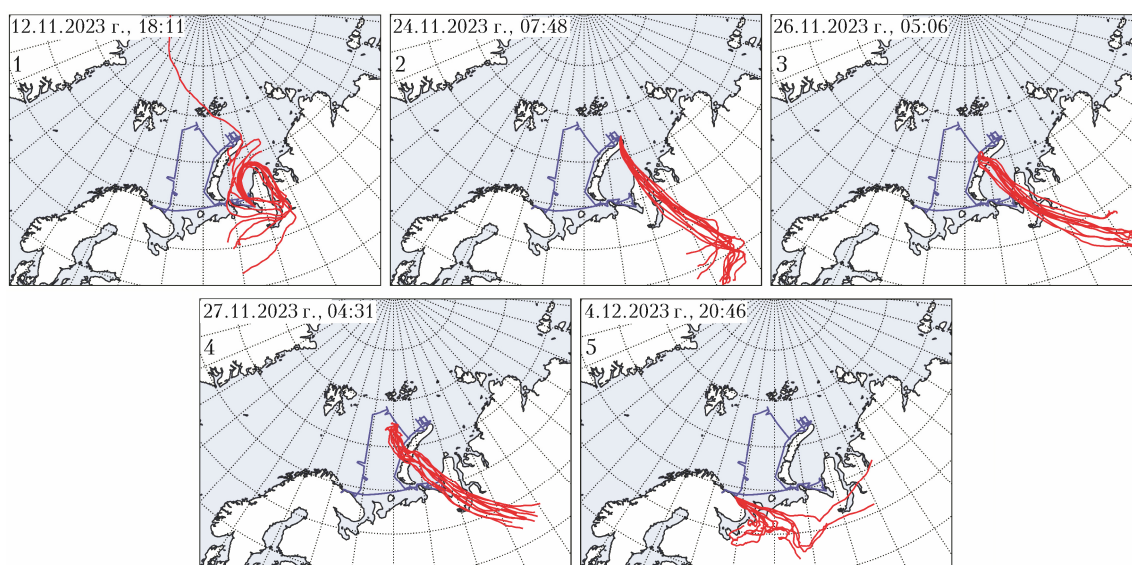


Рис. 5. Обратные кинематические траектории воздушных масс, рассчитанные по данным о среднем горизонтальном ветре (ERA-5) для уровней 1000, 975 и 950 мбар для эпизодов 1–5, отмеченных на рис. 4

поступлением загрязненного воздуха с континента при характерном времени переноса воздуха из регионов-источников метана (промышленных районов Урала и Западной Сибири) порядка 1–2 суток. В то же время для эпизода 1 выраженная адвекция в атмосферном пограничном слое из континентальных областей не наблюдалась: перенос на разных высотах имел разнонаправленный характер. Источником повышенных концентраций метана в этом случае могли быть эмиссии из болот Большеземельской тундры и Ямала, включая объекты добычи газа и газового конденсата на полуострове. Следовательно, наблюдаемая на рис. 4 изменчивость измеренного содержания метана имеет преимущественно адвективную природу: вынос с юга ответствен за повышение концентрации метана в приводном слое, тогда как при северном ветре были зафиксированы наиболее низкие (< 2035 ppb) концентрации. Последнее обстоятельство позволяет принять приведенную выше величину $[\text{CH}_4] = 2035$ ppb в качестве регионально фоновой для данного времени года (поздняя осень).

Для юго-восточной части Баренцева моря и Байдарацкой губы Карского моря высокие концентрации метана (эпизод 1) могут быть связаны не только с переносом воздуха со стороны континента, но и с разгрузкой метаносодержащих флюидов из осадков мелководной части шельфа [24, 39, 40]. Для проверки данного предположения была проведена серия модельных расчетов, оценивающих вклад континентальных источников и эмиссий на шельфе в приводное содержание метана по данным измерений 10–17.11.2023 г. в юго-западной части Карского моря (рис. 6).

Сравнивая представленные на рисунке результаты расчетов по сценариям E0, EK и ЕКМ, можно увидеть последовательное приближение результатов модельных расчетов к экспериментальным данным: от регионально фоновому уровню 2035 ppb и далее при учете источников за границами расчетной области (сценарий E0) ($R = 0,42$), континентальных и априорных морских эмиссий внутри расчетной об-

ласти (ЕК) ($R = 0,40$) и всех эмиссий, включая восстановленные эмиссии с поверхности моря (ЕКМ) ($R = 0,77$).

В сценариях E0 и ЕК модель качественно воспроизводит наблюдаемые долговременные тенденции в приводном содержании метана с главным максимумом в период 11–12 ноября и вторичными максимумами 14 и 16 ноября. Учет эмиссий на шельфе непосредственно вдоль судовой трассы по сценарию ЕКМ позволяет объяснить значительную часть наблюдаемой изменчивости содержания метана в приводном слое как в районах пиковых концентраций, включая период 11–12.11.2023 г., так и для всего времени наблюдений.

Основываясь на разности модельных концентраций метана в сценариях ЕК и ЕКМ ($\Delta[\text{CH}_4]$), можно провести оценку вклада восстановленных вдоль судовой трассы эмиссий метана в его приводное содержание. Для района Байдарацкой губы (рис. 6) медиана и диапазон вариаций значений $\Delta[\text{CH}_4]$ на уровне 25-й и 75-й перцентилей составляют 15,7 (11,2–23,1) $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, что сопоставимо с аналогичным вкладом континентальных и априорных морских эмиссий в модельном районе (разности величин в сценариях ЕК и E0): 9,4 (1,8–12,3) $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Результаты расчетов потоков метана по сценарию ЕКМ для эпизода 1 приведены на рис. 7. Поскольку основная часть значимых ($> 10 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) инструментальных измерений потоков метана была проведена в районе Байдарацкой губы Карского моря (11–16 ноября), анализ сфокусирован именно на этой акватории. Восстановленные вдоль судового маршрута потоки метана с морской поверхности достигают 483 $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и заметно (в 1,2–2,5 раза) превышают соответствующие априорные эмиссии (см. рис. 2), величина которых, таким образом, оказывается недостаточной для объяснения высоких приводных концентраций метана (рис. 6, сценарий ЕК). Средняя величина потока за период 10–17.11.2023 г. составила 20 $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, что близко к среднему значению для всей расчетной области (24 $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$).

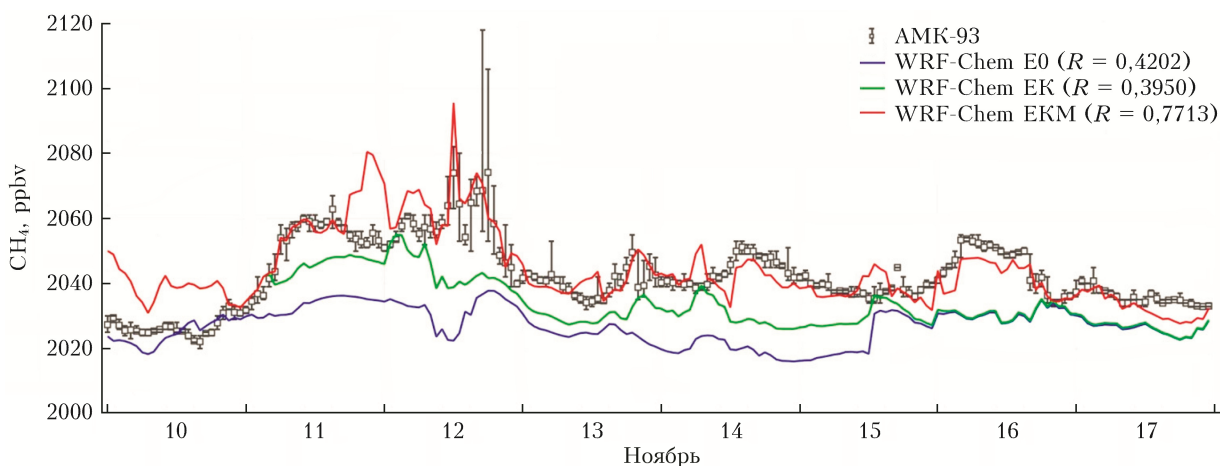


Рис. 6. Измеренные и модельные (сценарии E0, EK и ЕКМ) концентрации метана в приводном слое атмосферы в районе Байдарацкой губы; вертикальными линиями отмечены максимальные и минимальные средние минутные значения по судовым данным в пределах каждого часа

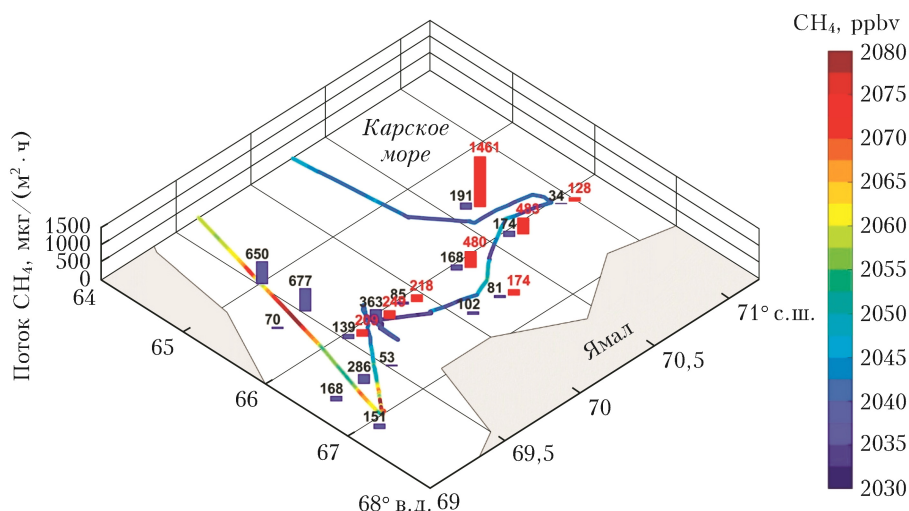


Рис. 7. Сравнение рассчитанных потоков метана с результатами судовых измерений в Байдаракской губе Карского моря 11–16.11.2023 г.; цветом показаны измеренные концентрации CH_4 в приводном слое вдоль маршрута экспедиции; красным и черным цветом выделены измеренные и рассчитанные величины потоков соответственно; рассчитанные значения приведены только для потоков выше $10 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Сравнение модельных потоков метана с данными прямых измерений камерным методом для района Байдаракской губы представлено на рис. 8 (см. также таблицу). Коэффициент парной корреляции R между модельными и экспериментальными потоками, рассчитанный по всем данным из таблицы, составляет 0,54. Однако при исключении anomalously высокого потока метана в северо-восточной части Байдаракской губы ($1461 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, 14 ноября), который значительно превышает остальные значения и не воспроизводится моделью, R возрастает до 0,70. Из рис. 8 также следует, что для 11 точек из 13 (общего числа измерительных пунктов) восстановленные потоки метана отличаются от измеренных не более чем в три раза. Наблюдаемые расхождения между модельными и измеренными потоками, хотя и довольно значительные для отдельных пунктов, не носят систематического характера:

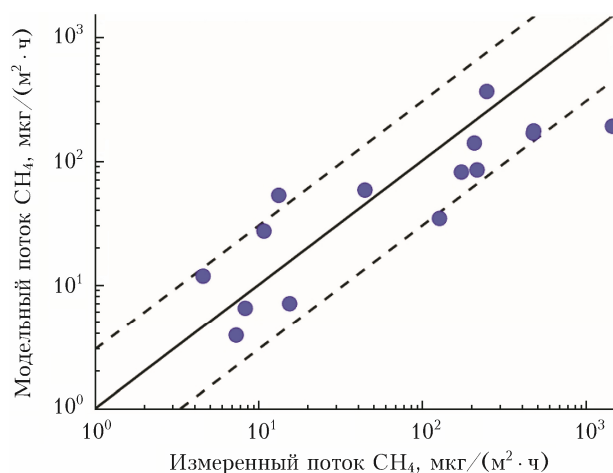


Рис. 8. Сравнение модельных и измеренных потоков метана в период 10–17.11.2023 г. (район Байдаракской губы); пунктирные линии ограничивают область, в которой модельные потоки отличаются от измеренных не более чем в три раза

общее число точек на рис. 8, в которых модель переоценивает измеренный поток (пять точек), не намного меньше числа пунктов, в которых поток недооценивается (восемь точек без учета величины $1461 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$).

Сравнение модельных и измеренных потоков метана, $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Координаты центра ячейки, град		Модель	Измерения, среднее значение (мин/макс)	Количество измерений
в.д.	с.ш.			
57,685	70,268	11,8	4,6 (3,0/6,3)	3
66,101	69,545	139	209 (172/244)	3
66,101	69,728	363	249 (221/278)	6
66,101	69,910	84,6	218 (148/355)	7
66,627	70,268	81,3	174 (153/216)	3
66,101	70,268	168	480 (220/818)	3
66,101	70,620	175	483 (316/651)	2
66,101	70,966	34,4	128 (97/159)	2
65,575	70,620	191	1461 (213/3163)	4
63,471	70,268	27,2	10,8 (9,8/11,8)	2
61,893	70,090	6,5	8,3 (4,3/13,8)	3
60,841	70,000	7,1	15,5 (12,1/19,5)	3
61,893	70,445	3,9	7,3 (5,2/9,3)	4
55,581	70,268	58,2	44,8 (28,5/58,7)	4
55,581	70,445	52,8	13,3 (11,0/16,5)	3

Согласно таблице медиана потока CH_4 и межквартильный диапазон ($P_{25} - P_{75}$) в районе Байдаракской губы составляют $86,4$ ($10,8 - 218$) $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (измерения) и $55,5$ ($11,8 - 139$) $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (модельные оценки). Максимальные значения потоков равны 363 и $483 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ соответственно. Анализ медиан и 75-х перцентилей позволяет сделать вывод о занижении моделью измеренных потоков примерно в 1,5 раза, что можно объяснить недостаточно высоким пространственным разрешением поля эмиссий в районе проведения измерений и неизбежными погрешностями при регионализации инструментальных оценок, выполненных по ограниченному набору измерительных пунктов.

Тем не менее расчеты по сценариям Е0, ЕК и ЕКМ (см. рис. 6) подтверждают наличие статистически достоверной положительной связи между потоком метана на границе раздела «вода — атмосфера» и его концентрацией в приводном слое. В то время как основная изменчивость концентрации метана при отсутствии морских эмиссий (см. рис. 6, сценарий ЕК) определяется направлением переноса воздушных масс (с акватории Арктического бассейна или континента), наличие источников на шельфе Карского моря способствует поддержанию повышенного уровня метана в приводном слое, в том числе непосредственно вдоль трассы судна (рис. 6, сценарий ЕКМ). Возможная высокая неоднородность поля эмиссий и смена условий атмосферного рассеяния привели к значительным флуктуациям как минутных, так и часовых концентраций (см. рис. 4, эпизод 1, и рис. 6), пиковые значения которых превышали региональный фоновый уровень на несколько десятков ppb.

Заключение

В ходе 93-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (8.11–7.12.2023 г.) были получены непрерывные минутные ряды концентраций CH_4 и CO_2 в приводном слое атмосферы. С помощью камерного метода на отдельных станциях проводились прямые измерения потоков метана на границе «атмосфера — подстилающая поверхность». Учитывая дефицит стационарных пунктов мониторинга парниковых газов в Арктике, подобные измерения, охватывающие значительные акватории арктических морей, представляют высокую научную ценность. Они позволяют детализировать современные знания о геологических, биологических и атмосферных факторах, определяющих баланс климатически активных газов в Арктической зоне Российской Федерации.

На основе модели WRF-Chem впервые получена оценка вклада морских эмиссий метана в его приводное содержание для российской части Западно-Арктического шельфа Евразии. Восстановленные по данным измерений приводных концентраций медианная и максимальная величины потоков метана с морской поверхности на шельфе Карского моря у западного побережья п-ова Ямал составили 55,5 и 363 $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ соответственно. Эти результаты качественно согласуются с аналогичными инструментальными оценками (86,4 и 483 $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$), полученными по ограниченному набору пунктов измерений потоков.

Приведенные выше модельные и инструментальные величины сопоставимы либо превышают показатели эмиссии метана в Большеземельской тундре и на заболоченных территориях Западной Сибири (40–270 $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) в холодный период года. Это указывает на потенциально значимую роль шельфа Карского моря в региональном атмосферном балансе метана. Достоверность полученных оценок обеспечивается хорошей согласованностью результатов модельных расчетов с двумя независимыми массивами инструментальных данных:

концентрациями метана в приводном слое и его потоков на границе «атмосфера — водная поверхность».

Полученные оценки эмиссий метана не претендуют на исчерпывающий характер, так как сделаны на основе анализа данных разовых измерений за ограниченный период. В дальнейшем результаты могут быть уточнены и дополнены аналогичными оценками для других перспективных районов исследования и/или сезонов года путем расширения анализа на другие районы и сезоны, используя данные нескольких морских экспедиций в европейском секторе Арктики. Предложенная методика восстановления потоков метана по измеренным концентрациям в приводном слое перспективна для количественной оценки как средних значений эмиссии, так и локальных выбросов из морских осадков (районы холодных метановых сипов) в условиях изменчивого атмосферного переноса и неоднородности эмиссионных полей на континенте и прилегающих шельфах арктических морей вдоль северного побережья Евразии.

Разработанный метод восстановления эмиссий метана с морской поверхности имеет широкие перспективы развития и значительный потенциал для улучшения понимания вклада арктического шельфа в глобальный баланс климатически активных газов в атмосфере.

Благодарности. Авторы выражают благодарность экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» и участникам экспедиции за помощь в проведении исследований в условиях низких температур и полярной ночи.

Финансирование. Подготовка данных, проведение модельных расчетов и анализ результатов выполнены при поддержке РНФ (проект № 25-77-31009). Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки «НИС «Академик Мстислав Келдыш»» в составе Центра коллективного пользования «Научный флот ИО РАН».

Список литературы

1. Canadell J.G., Monteiro P.M.S., Costa M.H., Cotrim da Cunha L., Cox P.M., Eliseev A.V., Henson S., Ishii M., Jaccard S., Koven C., Lohila A., Patra P.K., Piao S., Rogelj J., Syampungani S., Zaehle S., Zickfeld K. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.). Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge University Press, 2021. P. 673–816. DOI: 10.1017/9781009157896.007.
2. Anisimov O. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // *Environ. Res. Lett.* 2007. N 2. DOI: 10.1088/17489326/2/4/045016.

3. Christensen T.R., Ekberg A., Strom L., Mastepanov M., Panikov N., Mats O., Svensson B.H., Nykanen H., Martikainen P.J., Oskarsson H. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 7. DOI: 10.1029/2002GL016848.
4. Christensen T.R., Johansson T.R., Akerman H.J., Mastepanov M., Malmer N., Friborg T., Crill P., Svensson B.H. Thawing subarctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2004. P. L04501. DOI: 10.1029/2003GL018680.
5. Friborg T., Soegaard H., Christensen T.R., Lloyd C.R., Panikov N.S. Siberian wetlands: Where a sink is a source // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 21. P. 2129–2132. DOI: 10.1029/2003GL017797.
6. Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G., Zimov S.A., Chapin F.S. Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH₄ during the last deglaciation // *Science*. 2007. N 5850. P. 633–636. DOI: 10.1126/science.1142924.
7. Каллистова А.Ю., Саввичев А.С., Русанов И.И., Пуменов Н.В. Термокарстовые озера – экосистемы с интенсивными микробными процессами цикла метана // *Микробиология*. 2019. Т. 88, № 6. С. 631–644
8. Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrillov A.V., Tumskoy V.E., Kholodov A.L. Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands // *Quat. Sci. Rev.* 2004. V. 23. P. 1359–1369. DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.014.
9. Соловьёв В.А., Гинзбург Г.Д., Тепленев Е.В., Михалюк Ю.Н. Криогеотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. Л.: Севморгеология, 1987. 150 с.
10. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Романовский Н.Н., Космач Д.А., Никольский Д.Н., Никифоров С.Л., Саломатин А.С., Ананьев Р.А., Росляков А.Г., Салюк А.Н., Карнаух В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Юсупов В.И., Куриленко А.В., 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 // *Докл. РАН*. 2012. Т. 446, № 3. С. 330–335.
11. Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // *Вестн. РАН*. 2009. Т. 79, № 6. С. 507–518.
12. Winderlich J., Gerbig C., Kolle O., Heimann M. Inferences from CO₂ and CH₄ concentration profiles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) on regional summertime ecosystem fluxes // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. P. 2055–2068. DOI: 10.5194/bg-11-2055-2014.
13. Röbger N., Sachs T., Wille C., Boike J., Kutzbach L. Seasonal increase of methane emissions linked to warming in Siberian tundra // *Nat. Clim. Chang.* 2022. V. 12. P. 1031–1036. DOI: 10.1038/s41558-022-01512-4.
14. Peng S., Lin X., Thompson R.L., Xi Y., Liu G., Hauglustaine D., Lan X., Poulter B., Ramonet M., Chauvois M., Yin Y., Zhang Z., Zheng B., Ciais P. Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020 // *Nature*. 2022. V. 612. P. 477–482. DOI: 10.1038/s41586-022-05447-w.
15. Anisimov O., Zimov S. Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling // *Ambio*. 2021. V. 50. P. 2050–2059. DOI: 10.1007/s13280-020-01392-y.
16. Елисеев А.В., Малахова В.В., Аржанов М.М., Голубева Е.Н., Денисов С.Н., Мохов И.И. Изменение границ многолетнемёрзлого слоя и зоны стабильности гидратов метана на арктическом шельфе Евразии в 1950–2100 гг. // *Докл. РАН*. 2015. Т. 465, № 5. С. 598–603. DOI: 10.7868/S0869565215350170.
17. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата // *Исслед. Земли из космоса*. 2015. № 2. С. 1–14.
18. Thornton B.F., Geibel M.C., Crill P.M., Humborg C., Mörtz 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: 10.1002/2016GL068977.
19. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf // *Science*. 2010. V. 327. P. 1246–1250. DOI: 10.1126/science.1182221.
20. Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I., Belousov V., Muravya V., Flint M.V., Elansky N., Rakitin V., Shtabkin Yu., Berezina E. Ship-borne observations of atmospheric CH₄ and δ¹³C isotope signature in methane over Arctic Seas in summer and autumn 2021 // *Atmosphere*. 2022. V. 13, N 3. P. 1–13. DOI: 10.3390/atmos13030458.
21. Weber T., Wiseman N., 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.
22. Workman E., Fisher R.E., France J.L., Linse K., Yang M., Bell T., Dong Y., Jones A.E. Methane emissions from seabed to atmosphere in polar oceans revealed by direct methane flux measurements // *J. Geophys. Res.* Atmos. 2024. V. 129. DOI: 10.1029/2023JD040632.
23. Малахова В.В., Крайнева М.В. Чувствительность модели эмиссии метана с акватории морей арктического шельфа к параметризации процесса газообмена // *Оптика атмосф. и океана*. 2024. Т. 37, № 6. С. 519–524. DOI: 10.15372/AOO20240611; Malakhova V.V., Kraineva M.V. Sensitivity of the model of methane emission from Arctic shelf seas to gas exchange parameterization // *Atmos. Ocean. Opt.* 2024. V. 37, N 5. P. 698–705.
24. Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Скороход А.И., Васильева А.В., Кравчишина М.Д., Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б. Изменчивость концентрации метана в атмосфере Арктики по данным судовых измерений в 2023 году // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2025. Т. 61, № 6. С. 117–134.
25. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Матуль А.Г., Иванов В.В., Пестунов Д.А., Штабкин Ю.А., Баранов Б.В., Галкин С.В., Амбросимов А.К., Козина Н.В., Лукьянова О.Н., Немировская И.А. 93-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»: геосистемы Западно-Арктического шельфа Евразии в сезон активного развития осенне-зимней конвекции и полярной ночи // *Океанология*. 2024. Т. 64, № 4. С. 731–734. DOI: 10.31857/S0030157424040173.
26. Скороход А.И., Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Томпсон Р.Л., Новигатский А.Н., Голицын Г.С. Атмосферный метан и его изотопный состав над морями российской Арктики по результатам судовых измерений летом и осенью 2015 года // *Докл. РАН*. 2016. Т. 470, № 5. С. 1–5. DOI: 10.7868/S0869565216290247.
27. Erkkila K.-M., Ojala A., Bastviken D., Biermann T., Heiskanen J., Lindroth A., Peltola O., Rantakari M., Vesala T., Mammarella I. Methane and carbon dioxide fluxes over a lake: Comparison between eddy covariance, floating chambers and boundary layer method // *Biogeosci.* 2017. V. 15, N 2. P. 429–445. DOI: 10.5194/BG-15-429-2018.

28. Pestunov D.A., Shamrin A.M., Shmargunov V.P., Panchenko M.V. Gas-analytic measurement complexes of Baikal atmospheric-limnological observatory // Proc. SPIE. 2015. N 9680. DOI: 10.1117/12.2205538.
29. Пестунов Д.А., Домышева В.М., Шамрин А.М., Сакирко М.В., Панченко М.В. Потoki углерода в процессе газообмена CO₂ и CH₄ в системе «атмосфера – водная среда» прибрежной зоны Байкала // Фундаментальная и прикладная климатология. 2024. Т. 10, № 3. С. 399–412. DOI: 10.21513/2410-8758-2024-3-399-412.
30. Beck V., Koch T., Kretschmer R., Marshall J., Ahmadov R., Gerbig C., Pillai D., Heimann M. The WRF Greenhouse GasModel (WRF-GHG). Technical Report N 25. Jena: Max Planck Institute for Biogeochemistry, 2011. 195 p.
31. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X.-Y. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.1. National Center for Atmospheric Research, 2019. DOI: 10.5065/1DFH-6P97.
32. Kumar R., Pfister G., Drews C., Honomichl S., Attilo G.D. The WRF-Model coupled with Chemistry (WRF-Chem) Forecast Output over CONUS. NSF National Center for Atmospheric Research, 2021. DOI: 10.5065/7J5P-MC95.
33. Gettelman A., Mills M.J., Kinnison D.E., Garcia R.R., Smith A.K., Marsh D.R., Tilmes S., Vitt F.M., Bardeen C.G., McInerney J., Liu H.-L., Solomon S.C., Polvani L.M., Emmons L.K., Lamarque J.-F., Richter J.H., Glanville A.S., Bacmeister J.T., Phillips A.S., Randel W.J. The whole atmosphere community climate model version 6 (WACCM6) // J. Geophys. Res.: Atmos. 2019. V. 124. P. 12380–12403. DOI: 10.1029/2019JD030943.
34. Crippa M., Guizzardi D., Pagani F., Banja M., Muntean M., Schaaf E., Monforti-Ferrario F., Becker W., Quadrelli R., Risquez Martin A., Taghavi-Moharamli P., Köykkä J., Grassi G., Rossi S., Brandao de Melo J., Oom D., Branco A., San-Miguel J., Manca G., Pisoni E., Vignati E., Pekar F. GHG emissions of all world countries. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. DOI: 10.2760/4002897, JRC138862.
35. Bloom A.A., Bowman K.W., Lee M., Turner A.J., Schroeder R., Worden J.R., Weidner R., McDonald K.C., Jacob D.J. A global wetland methane emissions and uncertainty dataset for atmospheric chemical transport models (WetCHARTs version 1.0) // Geosci. Model Development. 2017. V. 10. P. 2141–2156. DOI: 10.5194/gmd-10-2141-2017.
36. Моисеенко К.Б., Штабкин Ю.А., Васильева А.В., Скороход А.И., Федорова Е.И. Региональные источники и сезонный цикл метана в центральной Сибири и Арктике: наблюдения и численные эксперименты // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 10. С. 822–833. DOI: 10.15372/AOO20231006; Moiseenko K.B., Shtabkin Yu.A., Vasileva A.V., Skorokhod A.I., Fedorova E.I. Regional sources and CH₄ seasonal cycle in Central Siberia and the Arctic: Observations and numerical calculations // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37, N 1. P. 82–93.
37. Глазoleв М.В., Клецов И.Е., Казанцев В.С., Филиппов И.В., Максютлов Ш.Ш. Эмиссии метана из болотных ландшафтов тундры Западной Сибири // Вестн. ТПИУ. 2010. Вып. 3, № 93. С. 78–86.
38. Vasileva A.V., Moiseenko K.B., Mayer J.-C., Jürgens N., Panov A., Heimann M., Andreae M.O. Assessment of the regional atmospheric impact of wildfire emissions based on CO observations at the ZOTTO tall tower station in central Siberia // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, N D07301. DOI: 10.1029/2010JD014571.
39. Portnov A., Smith A.J., Mienert J., Cherkashov G., Rekant P., Semenov P., Serov P., Vanshtein B. Off-shore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths > 20 m at the South Kara Sea shelf // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 3962–3967. DOI: 10.1002/grl.50735.
40. Portnov A., Mienert J., Serov P. Modeling the evolution of climate-sensitive Arctic subsea permafrost in regions of extensive gas expulsion at the West Yamal shelf // J. Geophys. Res.: Biogeosci. 2014. V. 119. P. 2082–2094. DOI: 10.1002/2014JG002685.

Yu.A. Shtabkin, K.B. Moiseenko, I.B. Belikov, V.A. Belousov, A.V. Vasileva, N.S. Kirillova, D.A. Pestunov, B.D. Belan, M.D. Kravchishina. Atmospheric methane concentration and fluxes on western part of Arctic Eurasian shelf in late autumn 2023: shipborne observations and model simulation.

Quantifying methane emissions from Arctic shelf seas is one of the most poorly studied issues of global greenhouse gas budget, largely due to the sparse observational network at high latitudes. This paper presents the results of continuous shipborne measurements of near-surface CH₄ and CO₂ concentrations in Kara and Barents Seas during the 93rd cruise of the scientific research vessel Akademik Mstislav Keldysh (8 November – 7 December 2023). For episodes of high methane mixing ratios (> 2050 ppb), backward trajectories of air masses were calculated, and in situ data were compared with simulations using the regional WRF-Chem model. This approach enabled spatial localization of emission sources and assessment of methane fluxes at water – atmosphere interface. The highest emissions, with median and peak values of 55.5 and 363 µg/(m²h), respectively, and a near-surface concentration of up to 2118 ppb, were found in southwestern Kara Sea (Baydaratskaya Bay), in good qualitative agreement with floating chamber flux measurements (86.4 and 483 µg/(m²h)). These values are comparable to or exceed wintertime methane fluxes from tundra and wetland ecosystems in Western Siberia (40–270 µg/(m²h)), thus pointing out to the potentially significant contribution of shelf emissions to regional atmospheric methane budget. The proposed approach for retrieving fluxes from near-surface concentration data can be applied to regionalization of point measurements and refining flux estimates in other Arctic areas where observational data are limited.