УДК 574.4+504.7

СТАЦИОНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ И ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ТУНДРОВЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ПОЛУОСТРОВА ТАЙМЫР

А. В. Панов[1], А. С. Прокушкин[1, 2], Е. А. Кукавская[1], И. Р. Путилин[1], Е. А. Ануев[1], М. А. Корец[1], В. Е. Арясов[1], Р. А. Колосов[1], М. Г. Бондарь[3]

[1] *Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

[2] *Сибирский федеральный университет, Институт экологии и географии 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79*

[3] *Объединенная дирекция заповедников Таймыра 663305, Норильск, ул. Кирова, 24*

E-mail: alexey.v.panov@gmail.com, prokushkin@ksc.krasn.ru, kukavskaya@ksc.krasn.ru, irputilin@mail.ru, djekizion@mail.ru, mik@ksc.krasn.ru, vova_aryasov@mail.ru, kolosov.ra@ksc.krasn.ru, mikisayan@ya.ru

Поступила в редакцию 17.03.2025 г.
Принята к публикации 23.06.2025 г.

Арктика – один из наиболее климатически уязвимых регионов планеты, где темпы роста температуры вдвое выше общемировых. Стремительное повышение температуры во многом обусловлено ростом концентрации в атмосфере парниковых газов. Прогнозы свидетельствуют, что сохранение данного тренда может привести к масштабному высвобождению углерода, аккумулированного в многолетнемерзлых породах. Масштабы и длительность ожидаемого эффекта неочевидны ввиду слабо развитого мониторинга парниковых газов в Российской Арктике: спорадичностью оценок их атмосферных вариаций и обмена с экосистемами. В работе приведены результаты исследований динамики парниковых газов атмосферы в эстуарной зоне р. Енисей, свидетельствующие об устойчивом ежегодном приросте CO_2 (~1.9 млн$^{-1}$/год) и CH_4 (~12.6 млрд$^{-1}$/год). Представлены показатели почвенной эмиссии этих газов для разных типов тундры и растительного покрова западного побережья п-ова Таймыр, согласно которым наиболее высокие значения характерны для участков с произрастанием сосудистых форм растений. Нарушения живого напочвенного покрова вездеходной техникой приводят в среднем к трехкратному увеличению эмиссии метана в атмосферу.

Ключевые слова: *Арктика, атмосфера, климат, диоксид углерода, метан, потоки углерода.*

DOI: 10.15372/SJFS20250402

ВВЕДЕНИЕ

Среди ключевых регионов мира, отнесенных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) к климатически уязвимым, наибольшие изменения параметров климата и окружающей среды наблюдаются в Арктике (IPCC, 2019), где темпы роста температуры, фиксируемые в последние десятилетия, в особенности в холодные сезоны года (Fraser et al., 2014), существенно превышают общемировые и средние значения для Северного полушария (Bekryaev et al., 2010; Blunden, Arndt, 2019; Richter-Menge et al., 2019). Так, спутниковые наблюдения и наземные данные уже свидетельствуют об «озеленении» тундры, обусловленном сокращением сроков устойчивого снежного покрова и ростом продолжительно-

сти физиологической активности растительного покрова (Serreze et al., 2000; Bhatt et al., 2010; Hinzman et al., 2013; Park et al., 2016; Richter-Menge et al., 2019; Berner et al., 2020). Стремительное повышение температуры в Арктике во многом связывают с неуклонным ростом содержания климатически активных (парниковых) газов (ПГ) в атмосфере, и, по существующим прогнозам, сохранение текущего тренда может инициировать масштабные процессы высвобождения углерода, аккумулированного за многие тысячелетия в почвах криолитозоны (Dolman et al., 2012; Hayes et al., 2014; Hugelius et al., 2014; Schuur et al., 2015). Подобный эффект, в свою очередь, через систему климатических обратных связей (Friedlingstein et al., 2014) может выступить дальнейшим триггером еще большего потепления климата.

Оценки бюджета углерода в экосистемах криолитозоны свидетельствуют, что арктические экосистемы выступают стоком для диоксида углерода (200–400 Тг С/год) (McGuire et al., 2009, 2012; Dolman et al., 2012; Швиденко, Щепащенко, 2014) и источником метана в атмосферу (33–46 Тг С/год) (McGuire et al., 2009, 2012). Вместе с тем сохранение или трансформация их текущего статуса в секвестрации углерода атмосферы при существующих темпах роста температуры остается открытым вопросом ввиду крайне слабо развитого систематического мониторинга климатически активных газов в Российской Арктике. Здесь размещены лишь семь станций, где с большей или меньшей степенью регулярности организован высокоточный мониторинг ПГ атмосферы: пос. Териберка (Кольский п-ов, Баренцево море, с 1999 г.), пос. Новый Порт (п-ов Ямал, Обская губа, с 2002 г.), ГМО Тикси (побережье моря Лаптевых, с 2011 г.), полярная обсерватория «Мыс Баранова» (о. Большевик, Северная Земля, с 2013 г. (в настоящее время измерения приостановлены)), станция Амбарчик (побережье Восточно-Сибирского моря, с 2014 г.), станция Остров Белый (п-ов Ямал, с 2016 г. (измерения приостановлены)) и недавно открытый карбоновый полигон «Семь лиственниц» (п-ов Ямал, с 2024 г.). С 2018 г. специалистами ИЛ СО РАН проводятся исследования на мониторинговой станции DIAMIS, размещенной на западном побережье п-ова Таймыр в эстуарной зоне р. Енисей (г. п. Диксон) (Panov et al., 2022*a*). На территории Арктической зоны Красноярского края (~1.1 млн км^2) это единственный инструментальный полигон для круглогодичных прецизионных наблюдений ПГ атмосферы, расположенный за Северным полярным кругом.

Цель настоящей работы – отразить текущий статус, направления и основные результаты инструментальных исследований атмосферной динамики и потоков ПГ в тундровых экосистемах п-ова Таймыр.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований расположен в эстуарной зоне р. Енисей на западном побережье п-ова Таймыр. Представлен южной частью подзоны арктических тундр, граничащих с подзоной северных гипоарктических тундр (Walker et al., 2005). Тип климата – полярный, или тундровый по классификации Кёппена (McKnight, Hess, 2000). Климатограмма для района исследований, построенная по данным метеостанции «Остров Диксон» (WMO ID: 20674) за период доступных наблюдений (1916–2023 гг.), представлена на рис. 1.

Среднегодовая температура –10.8 °С, среднегодовое количество осадков 348.5 мм. Холодный период года длится ~4.5 мес, с наиболее низкими среднемесячными температурами в январе (–26.2 °С) и феврале (–25.0 °С). Безморозный период продолжается ~98 дней, с середины июня до середины сентября, с наиболее высокими среднемесячными температурами (5.5 °С) в августе (рис. 1). Многолетняя роза ветров демонстрирует преимущественное преобладание юго-западных (континентальный сектор) и северо-восточных (океанический сектор) ветров в течение года, с видимыми сезонными разли-

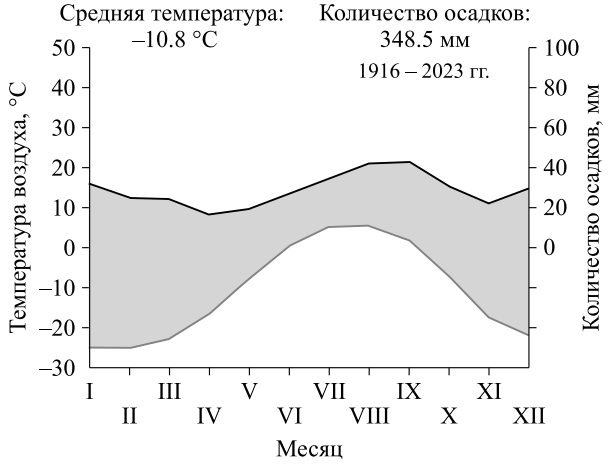

Рис. 1. Климатограмма района исследований.

чиями (Panov et al., 2022*a*). Так, зимний период года отмечается ветровым переносом с южных и юго-западных направлений, а в межсезонье с определенной частотой могут наблюдаться северо-восточные (осень), юго-восточные и северо-восточные ветры (весна). Летом район исследований подвержен преимущественному влиянию северо-восточных ветров (океан) и, в существенно меньшей степени, воздушных масс (ВМ) с юго-западных направлений (континент).

Долгосрочная мониторинговая программа в районе исследований предполагает сопряжение восходящей (bottom-up) и нисходящей (top-down) стратегий оценки депонирования углерода экосистемами, что позволяет получать как локальные (биогеоценотические), так и интегрированные (ландшафтные) оценки потоков ПГ. Реализация нисходящего режима моделирования базируется на потенциале станции мониторинга климатически активных газов атмосферы DIAMIS (73.5068° с. ш., 80.5198° в. д.), расположенной в пределах г. п. Диксон (с 2018 г.) (Panov et al., 2022*a*), измерения на которой, в свою очередь, комплементарны исследованиям обсерватории ZOTTO (60.48° с. ш., 89.23° в. д.) (с 2006 г.) в среднетаежной подзоне Центральной Сибири (Winderlich et al., 2010; Heintzenberg et al., 2011; Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018). Сопряженные измерения двух мониторинговых станций охватывают значительные территории Западной Сибири (рис. 2, *а*).

Так, среднегодовая область охвата измерений мачты DIAMIS, рассчитанная на основе лагранжевой траекторной модели ARL NOAA HYSPLIT (Panov et al., 2022*a*) и отражающая вероятный вклад подстилающей поверхности в вариации состава ПГ атмосферы (от англ. «футпринт»), составляет 625 тыс. км^2: от ~490 тыс. км^2 осенью до максимального домена ~900 тыс. км^2 в зимний период (рис. 2, *а*). Среднегодовой футпринт обсерватории ZOTTO, по данным лагранжевой транспортной модели STILT (Урбан и др., 2019; Urban et al., 2019), и вовсе достигает ~2.5 млн км^2.

Измерения мольных фракций диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и водяного пара (H_2O) в приземном слое атмосферы на мониторинговой станции DIAMIS проводились газоанализаторами модели Picarro G2301-f (Picarro Inc., США) (2018–2021 гг.) и LI-7810 (LI-COR Inc., США) (2023-н/в). Точность измерений составляет < 0.4 млн$^{-1}$ для CO_2 и < 0.25 млрд$^{-1}$ для CH_4.

Мониторинг проводился в квазинепрерывном режиме, с отбором атмосферного воздуха на высоте 35 м н. у. м. с метеорологической мачты (рис. 2, *б*), что в условиях перемешивания ВМ дает интегрированную оценку потоков ПГ как природного, так и антропогенного происхождения над значительной территорией.

Сопутствующие наблюдения ключевых метеорологических параметров включали измерения ветровых характеристик (анемометр-термометр Gill R3-50, Gill Instruments ltd., Великобритания), температуры и влажности воздуха (T/RH Vaisala HMP155, Vaisala Corp., Финляндия), осадков (TRM-525M, Texas Electronics Inc., США). Данные состава ПГ атмосферы сохранялись на измерительном персональном компьютере, метеорологические параметры записывались на центральном регистраторе данных Sutron 9210B XLite (Sutron Corp., США) (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022*b*).

В свою очередь, восходящий режим наблюдений реализован на участке «Бухта Медуза» Государственного природного заповедника (ГПЗ) «Большой Арктический» (в зоне футпринта станции DIAMIS), где на постоянных пробных площадках (пп) проводятся многолетние исследования компонентов углеродного цикла в мохово-осоково-лишайниковой (рис. 3, *а*), мохово-лишайниковой каменистой (рис. 3, *б*) и злаково-осоковой (рис. 3, *в*) типах тундры. Стационарные наблюдения потоков ПГ и реализация полевых манипуляционных экспериментов сопряжены с круглогодичным мониторингом метеорологических условий посредством размещенных в 2021 г. автоматических программных комплексов (АПК), техническое описание которых представлено в работе А. В. Панова и соавт. (2024). Измерения почвенной эмиссии CO_2 и CH_4 с сопутствующей регистрацией значений температуры и влажности почвы на глубине корнеобитаемого слоя (10 см) на пп проводились в вегетационные сезоны 2020–2024 гг. с помощью газоанализаторов LI-6400 (CO_2) и LI-7810 (CO_2, CH_4) (LI-COR Inc., США) с портативными почвенными камерами, устанавливаемыми на ПВХ кольца, в местах размещения АПК в трех типах тундры, репрезентативных для территории исследований (рис. 3).

В мохово-осоково-лишайниковой и мохово-лишайниковой каменистой типах тундры при установке ПВХ колец было выбрано несколько классов напочвенного покрова: морозобойные участки оголенной почвы, лишайники, мхи, мхи/

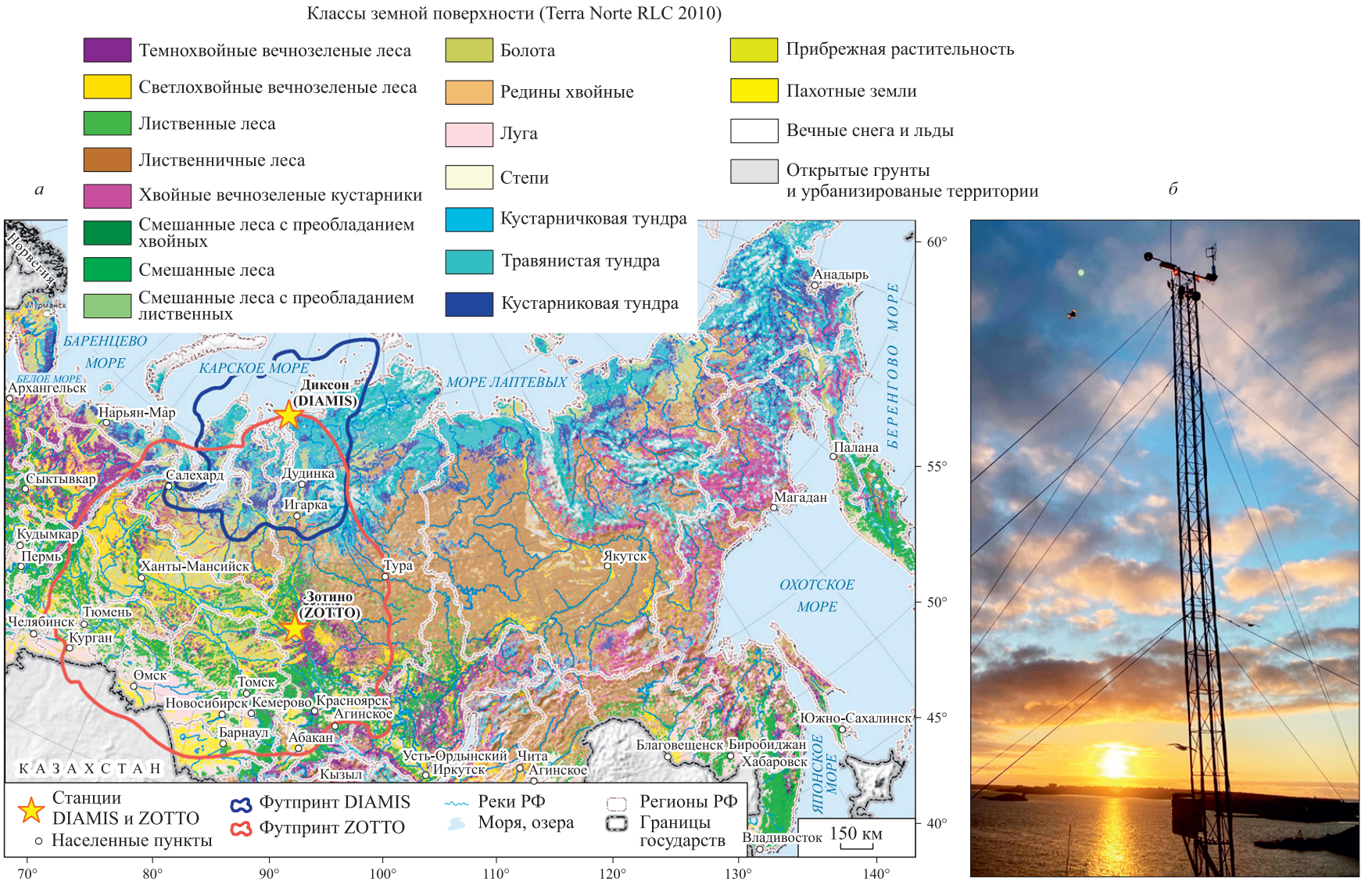

Рис. 2. Зоны футпринта станции DIAMIS (полярный пояс) и обсерватории ZOTTO (среднетаежная подзона) Средней Сибири с классами наземных экосистем RLC 2010 (Bartalev et al., 2014) (*а*) и мачта станции DIAMIS с размещенными на вершине метеорологическими датчиками и воздухозаборником (*б*).

Рис. 3. Автоматические программные комплексы круглогодичного метеорологического мониторинга, размещенные в мохово-осоково-лишайниковой (*а*), мохово-лишайниковой каменистой (*б*) и злаково-осоковой (*в*) типах тундры, на участке «Бухта Медуза» ГПЗ «Большой Арктический».

травы, мхи/осока (*Carex* L.). В злаково-осоковой тундре в составе живого напочвенного покрова доминировали злаково-осоковые ассоциации, где и проводились измерения. При последующем анализе интенсивности эмиссии соответствующие классы растительного покрова дополнительно агрегировали в группы растений: несосудистые и сосудистые формы, смешанная группа.

При картографировании ландшафта территории определение напочвенного покрова проводилось с использованием мультиспектральных (NIR-R-G-NDVI) снимков, полученных с применением беспилотного носителя (платформы) DJI 4 Pro Multispectral (SZ DJI Technology Co., Ltd., КНР), с размещенной на нем мультиспектральной камерой (разрешение 0.16 м): четырехполосные ортофотоизображения были сегментированы (подход Multiresolution – Trimble eCognition) и классифицированы (метод IsoCluster – ESRI ArcGIS). Определение и предварительное объединение генерализованных классов напочвенного покрова было проведено на основе классификации растительного покрова *in situ*. Запасы органического вещества на поверхности почвы для выделенных классов оценивались методом укосов и монолитов. В каждом типе фитоценоза закладывали 5–10 площадок. Живой напочвенный покров отбирали на учетных площадках 33 × 33 см. Размер площадки для взятия мортмассы определялся мощностью органического горизонта. В более сухих условиях произрастания с небольшой глубиной органического слоя он составлял 20 × 25 см, а в увлажненных условиях при большой мощности органического горизонта – 10 × 10 см.

Статистическая обработка и визуализация результатов проведены в программной среде R v4.4.2 (R Core Team, Австрия).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация CO_2 и CH_4 в приземной атмосфере

Годовой ход мольных фракций диоксида углерода в приземной атмосфере района исследований носит выраженный сезонный характер, в целом повторяющий динамику CO_2 в других регионах мира (Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018; Antonov et al., 2018; Belikov et al., 2019; Ивахов и др., 2019; Ivakhov et al., 2019; Reum et al., 2019; Poddubny et al., 2020*a*; Панов и др., 2024) (рис. 4, *а*).

Различия от прочих участков мониторинга в наибольшей степени отражены в размерностях годовой амплитуды колебания, связанных с природно-климатическими условиями, влиянием Северного Ледовитого океана (СЛО) на формирование газового состава атмосферы и динамикой морского льда (Алексеев, Нагурный, 2005; Alekseev, Nagurny, 2005). Для сезонного хода CO_2 характерен острый летний минимум и максимальные значения в зимний период. Зимой в районе исследования преобладают антропогенные источники ПГ, о чем могут свидетельствовать доминирующее (> 70 %) влияние южных ветров с континентальной части (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022*b*) и локализация вероятных источников CO_2, по данным глобальных продуктов по эмиссии углерода (VIIRS-based Fire Emission Inventory) (Ferrada et al., 2022)) (рис. 4, *б*).

Весной (апрель), несмотря на сохранение стабильно отрицательных значений температуры воздуха (см. рис. 1) и полное отсутствие биотической активности в районе исследований, начинает наблюдаться спад концентрации CO_2 (рис. 4, *а*), что отражает понижение гло-

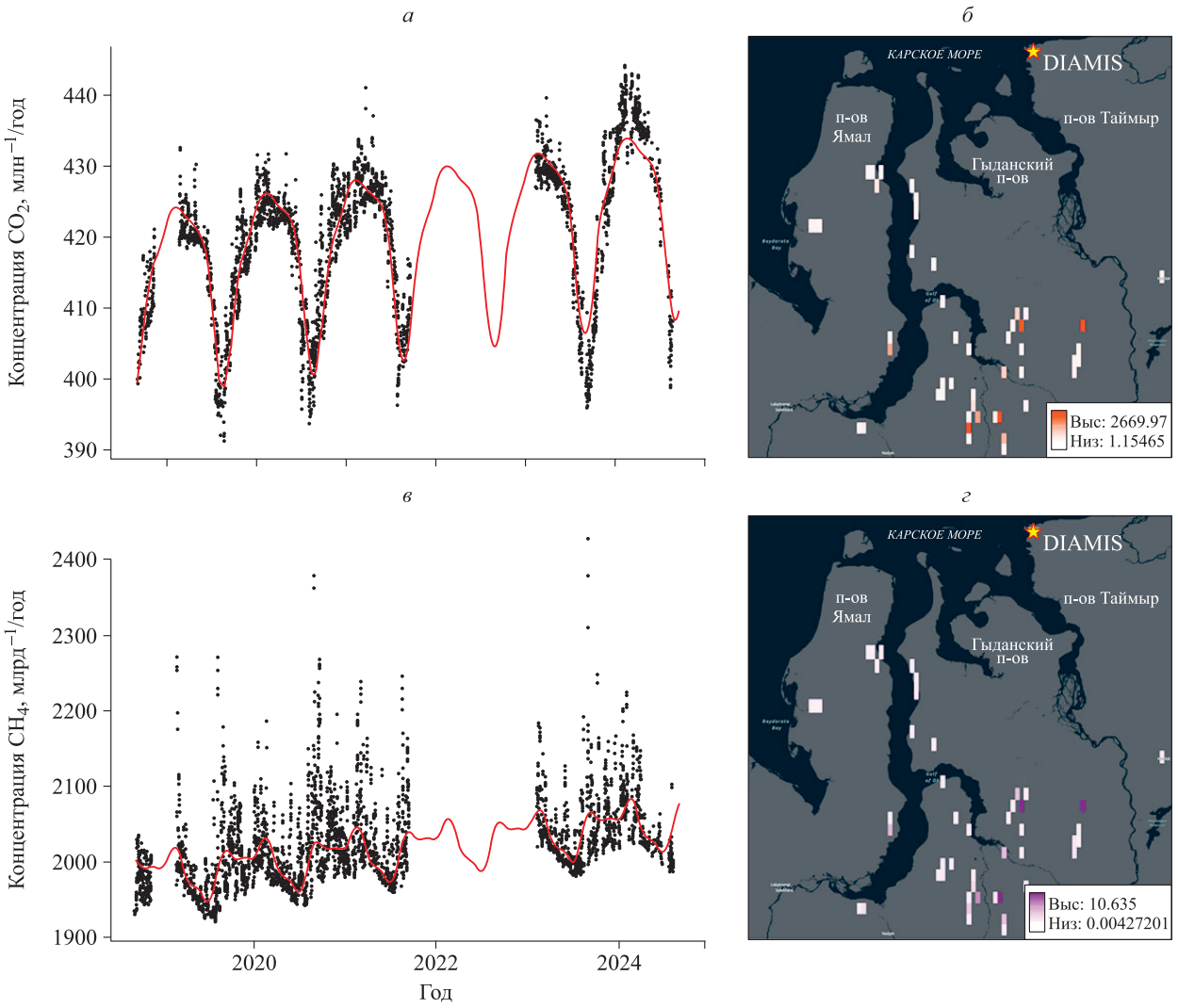

Рис. 4. Сезонный ход концентрации CO_2 (*а*) и CH_4 (*в*) в атмосфере эстуарной зоны р. Енисей за период измерений с 2018 по 2024 гг. Технический пробел в наблюдениях (11.2021–02.2023) вызван поломкой действующего газоанализатора и последующей его заменой. Представлены полуденные (13:00–16:00) значения мольных фракций в период наибольшего перемешивания атмосферного воздуха. Аппроксимирующая кривая рассчитана с использованием гармонической функции. Локализация вероятных источников ПГ в футпринте станции: диоксид углерода (*б*) и метан (*г*) со шкалами диапазона их выбросов.

бального уровня атмосферного CO_2 за счет запуска процессов фотосинтетической ассимиляции углерода в более южных регионах. Более резкое снижение концентрации CO_2 отмечается в июне, что свидетельствует уже о начале сезона вегетации непосредственно в экосистемах тундры.

Ближе к середине и концу летнего сезона (июль-август) в регистрируемых сигналах CO_2 атмосферы возрастает влияние (~60 %) ВМ с северо-восточных направлений (акватория СЛО), а вклад континентальной части не превышает 40 % с существенным влиянием западного побережья п-ова Таймыр и северных оконечностей п-вов Гыданский и Ямал (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022*b*). В том числе можно предполагать и захват шлейфов от вероятных антропогенных источников ПГ в данных областях (рис. 4, *б*).

Дальнейшее снижение уровня атмосферного CO_2 и достижение минимальных значений отмечается в период наибольшей физиологической активности экосистем в районе исследований (август) и влияния открытой воды. Летний минимум составляет ~10 дней и сдвинут на более поздние сроки (начало июля) в сравнении с ранее представленными оценками для подзоны средней тайги Центральной Сибири по данным обсерватории ZOTTO (Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018).

В течение всего периода наблюдений (2018–2024 гг.) отмечен устойчивый прирост концентрации атмосферного CO_2 на уровне ~1.9 млн$^{-1}$/год (~0.45 % в год от глобального его содержания в атмосфере), что ниже значения в 2.5 млн$^{-1}$/год, представленного по данным обсерватории ZOTTO (Панов и др., 2024). Вероятно, это обусловлено существенным влиянием СЛО на формирование атмосферного фона CO_2 в регионе исследований. Так, ранее было отмечено, что для ВМ приходящих с акватории СЛО характерны более низкие концентрации ПГ в сравнении с континентальной частью (Panov et al., 2022*a*).

Сезонная динамика метана менее выражена, но для нее также характерно наличие зимнего максимума (февраль), минимальные значения не регистрируются в летний период, однако в целом наблюдаются существенные сигналы выделения метана в атмосферу на протяжении теплого времени года, что ранее также отмечалось в мониторинговых исследованиях на побережье Восточно-Сибирского моря (Reum et al., 2019) и п-ова Ямал (Поддубный и др., 2020; Poddubny et al., 2020*b*) (рис. 4, *в*). В период полярной ночи в районе исследований (декабрь-январь) фотохимический сток метана неэффективен (Montzka et al., 2011), превалирующие ветры отмечаются с южных (континентальных) направлений, а распределение аномалий CH_4 может соответствовать локализации его возможных антропогенных источников на п-овах Гыданский и Ямал, что также согласуется с данными Е. Чувилина с соавт. (2020) (рис. 4, *г*).

Летом наблюдается усиление частот прихода и влияния ВМ с акватории Карского моря (СЛО), а континентальные сигналы CH_4 (до 40 %) отмечаются, главным образом, с южных и западных направлений. В целом минимальные летние значения атмосферного CH_4 в прибрежной зоне СЛО в районе исследований ниже, чем ранее отмечалось для континентальной части региона в подзоне средней тайги (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022*b*), где существенный вклад вносят эмиссии метана болотными комплексами Западной Сибири. К концу лета – началу осени сигналы метана становятся более выраженными, что может быть обусловлено как наибольшей глубиной протаивания и соответственно прогревания деятельного слоя почвы и полноценной активацией микробных сообществ, так и максимальным количеством атмосферных осадков в августе-сентябре, которые могли приводить к эпизодическому выдавливанию почвенного CH_4 дождевой водой (см. рис. 1).

В более поздние осенние месяцы сигналы выделения метана еще могут наблюдаться в течение достаточно продолжительного периода времени в зависимости от сезона, когда температура почвы сохраняется в околонулевом диапазоне (т. н. эффект «нулевого барьера»), и окончательно прекращаются со стабильным переходом температуры к отрицательным значениям и полным промерзанием деятельного слоя почвы. В холодный (осенне-зимний) период года в районе мониторинговой станции вновь усиливается влияние континентальной части. В целом представленный в работе период наблюдений (2018–2024 гг.) характеризовался устойчивым ежегодным приростом CH_4 на уровне ~12.6 млрд$^{-1}$/год (~0.65 % в год от глобального его содержания в атмосфере), что несколько выше значения ~10.2 млрд$^{-1}$/год, фиксируемого на текущий момент в континентальной части бассейна р. Енисей (обсерватория ZOTTO).

Растительный покров и запасы органического вещества в экосистемах зоны охвата мониторинговой станции

Как отмечено в методической части работы, среднегодовая зона охвата измерений мониторинговой станции DIAMIS, отражающая степень влияния подстилающей поверхности на регистрируемую динамику атмосферы («футпринт»), составляет 625 тыс. км^2, существенно варьируя по сезонам. Летом, в период наибольшего влияния физиологической активности растительного покрова на газовый состав приземной атмосферы, футпринт достигает 541 тыс. км^2 и формируется преимущественно океаническим сектором (акватория Карского моря) (326 тыс. км^2; 60.7 %) и приуроченными к побережью СЛО территориями тундры (215 тыс. км^2; 39.3 %) юго-западного побережья п-ова Таймыр и северных оконечностей п-вов Гыданский и Ямал (рис. 5, *а*, *б*). Данные тундровые ландшафты формируют большинство тех биогенных сигналов ПГ, что вносят вклад в вариации их атмосферного состава, фиксируемого на мониторинговой станции.

На рис. 5, *а* летний футпринт станции DIAMIS наложен на карту растительного покрова RLC 2013 (Bartalev et al., 2014), которая ввиду своей мелкой масштабности не всегда объективно отражает крайне мозаичную растительность тундровых ландшафтов. В связи с этим в ходе работ была проведена предварительная

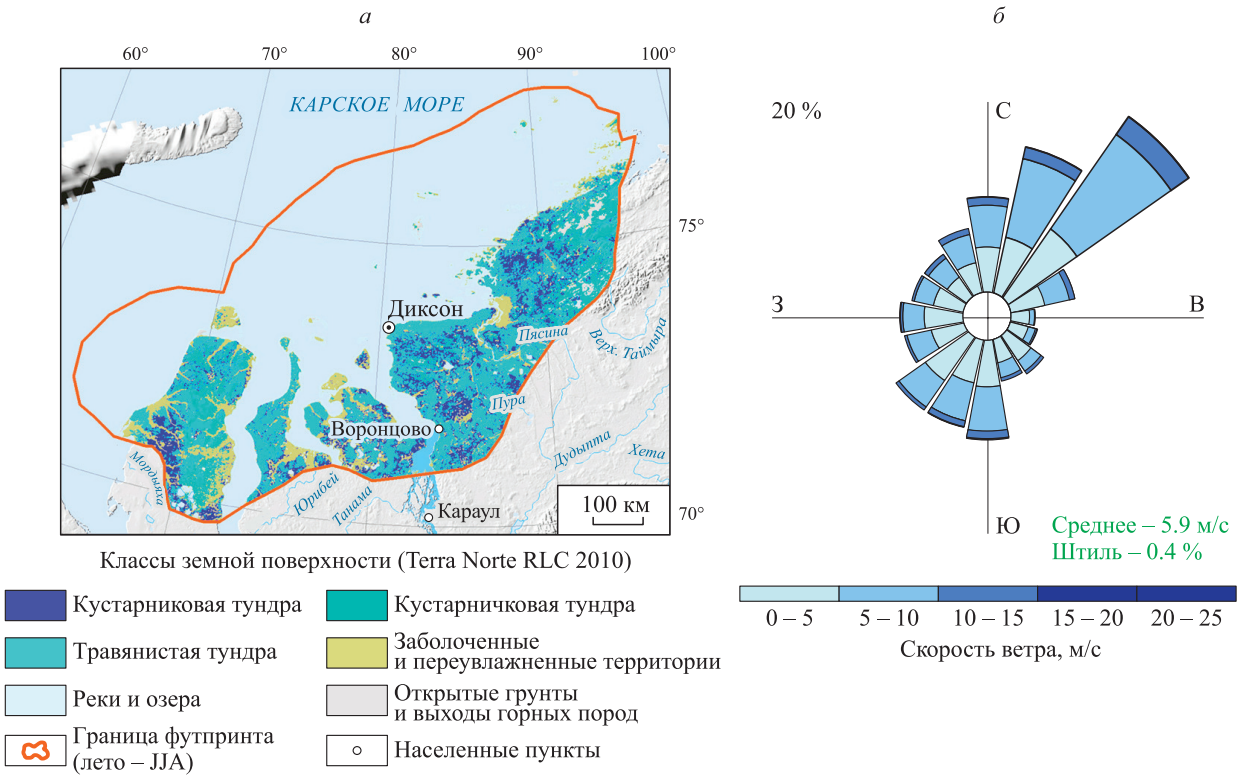

Рис. 5. Зона охвата измерений (футпринт) мониторинговой станции DIAMIS в летний период с классами растительного покрова согласно RLC 2013 (*а*) и летняя роза ветров (*б*).

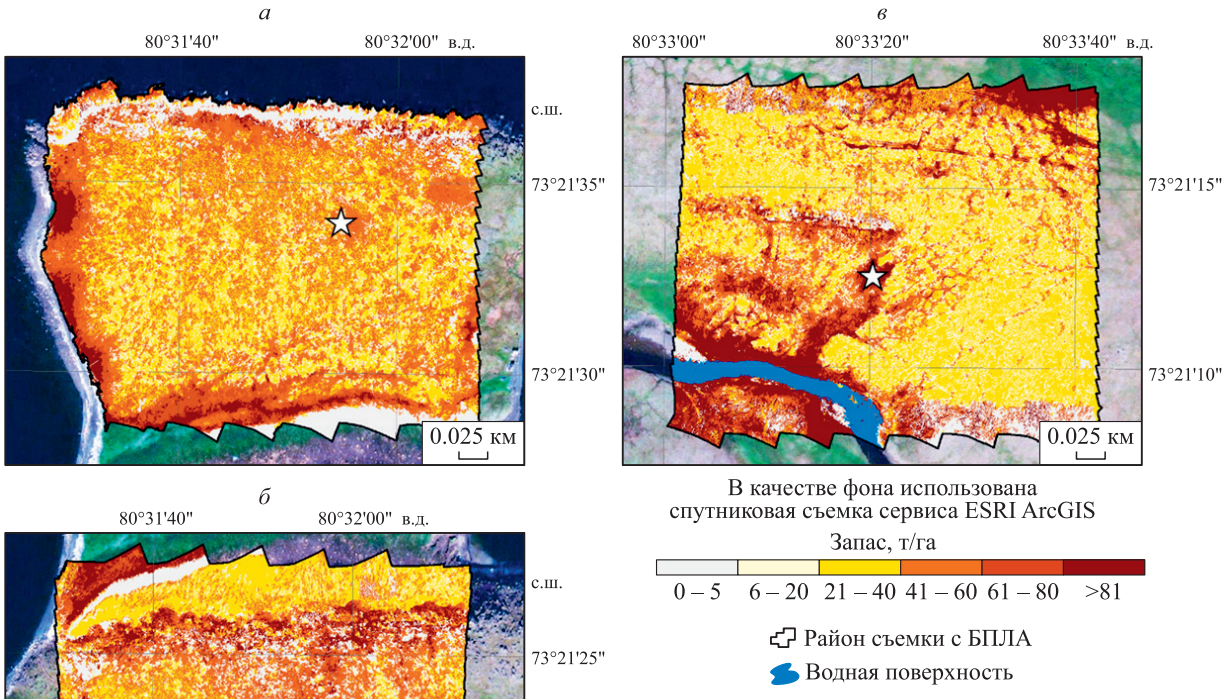

Рис. 6. Запасы органического вещества на поверхности почвы для тестовых участков, где размещены АПК на постоянных пробных площадках в мохово-осоково-лишайниковой (*а*), мохово-лишайниковой каменистой (*б*) и злаково-осоковой (*в*) типах тундры. Звездами обозначены места расположения АПК. БПЛА – беспилотный летательный аппарат

подспутниковая валидация типов растительности для района исследований с использованием анализа данных дистанционного зондирования Земли, мультиспектральной аэрофотосъемки на базе беспилотного летального аппарата и наземной характеристики растительного покрова. Картирование растительности проведено на территории «Бухта Медуза» ГПЗ «Большой Арктический» (в футпринте станции DIAMIS) для трех репрезентативных тестовых участков, где размещены автоматические комплексы круглогодичного метеорологического мониторинга и проводятся стационарные исследования потоков ПГ. Для полученных в ходе съемки композитов были выделены генерализованные классы растительного покрова и проведена оценка запасов органического вещества на поверхности почвы с последующим их картированием на территории тестовых участков (рис. 6).

Установлено, что минимальными запасами органического вещества на поверхности почвы характеризуются поверхности бугров полигональной тундры (5.9 ± 1.8 т/га) и наиболее сухие фитоценозы с преобладанием лишайника в составе живого напочвенного покрова (20.6 ± 4.9 т/га). В свою очередь, травянистые и мохово-травянистые фитоценозы, а также заболоченные участки тундры характеризуются большей мортмассой в связи с высокой влажностью, медленными темпами разложения органического вещества, а также в связи с его накоплением в более благоприятных условиях местопроизрастания.

Почвенные эмиссионные потоки CO_2 и CH_4 в экосистемах

Почвенная эмиссия CO_2 измерялась в вегетационные сезоны 2021–2023 гг. на стационарных площадках в мохово-лишайниковой каменистой, мохово-осоково-лишайниковой и злаково-осоковой типах тундры (рис. 7, *а*) для разных классов напочвенного покрова (рис. 7, *б*).

Установлено, что средний эмиссионный поток CO_2 в пик вегетационного сезона в районе исследований (конец июля – середина августа) достигает 2.2 ± 1.3 мкмоль/(м^2 · с), демонстрируя статистически значимые различия (F = 3.03; P = 0.000) для разных типов тундры (рис. 7, *а*): от минимальных значений на участке мохово-лишайниковой каменистой тундры (1.1 ± 0.6 мкмоль/(м^2 · с)), средних в мохово-осоково-лишайниковой тундре (1.8 ± 1.0 мкмоль/(м^2 · с)) и до наибольших значений, отмеченных в злаково-осоковой тундре (3.6 ± 0.5 мкмоль/(м^2 · с)).

Между разными классами напочвенного покрова также были отмечены значимые различия (F = 2.25; P = 0.000). В целом для различных групп растений (НСР, СМШ, СР) отмечен рост эмиссионного потока CO_2 по направлению от несосудистых (лишайники, мхи) к сосудистым формам растений, от 1.0 ± 0.4 до 3.6 ± ± 0.5 мкмоль/(м^2 · с) соответственно (рис. 7, *б*). В свою очередь, интенсивность эмиссии для разных классов напочвенного покрова изменялась от минимальных значений, отмеченных на морозобойных участках оголенной почвы

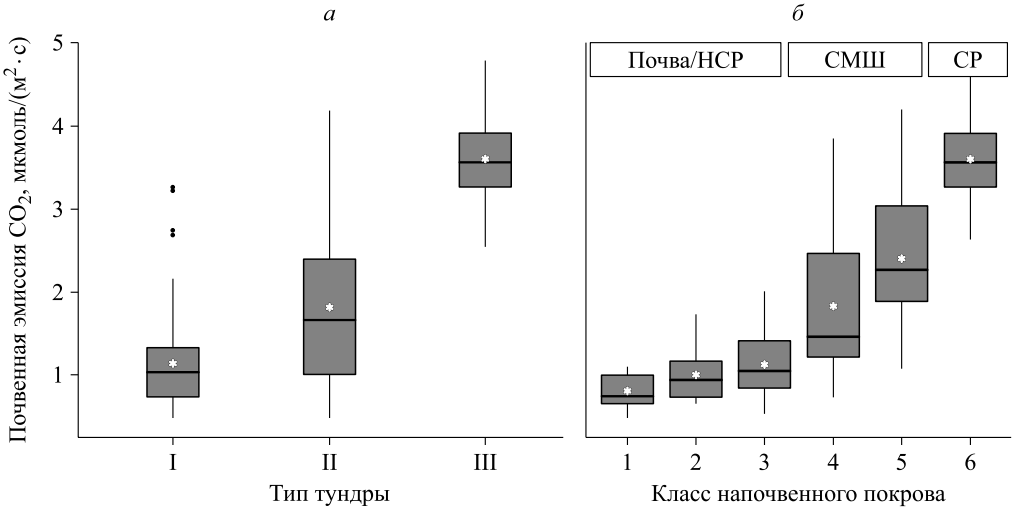

Рис. 7. Почвенная эмиссия CO_2 для мохово-лишайниковой каменистой (I), мохово-осоково-лишайниковой (II) и злаково-осоковой (III) типов тундры (*а*) и для разных групп (НСР – несосудистые растения, СМШ – смешанная группа, СР – сосудистые формы растений) и классов напочвенного покрова, где 1 – морозобойные участки почвы; 2 – лишайники; 3 – мхи; 4 – мхи/травы; 5 – мхи/осока; 6 – осока/злаки (*б*).

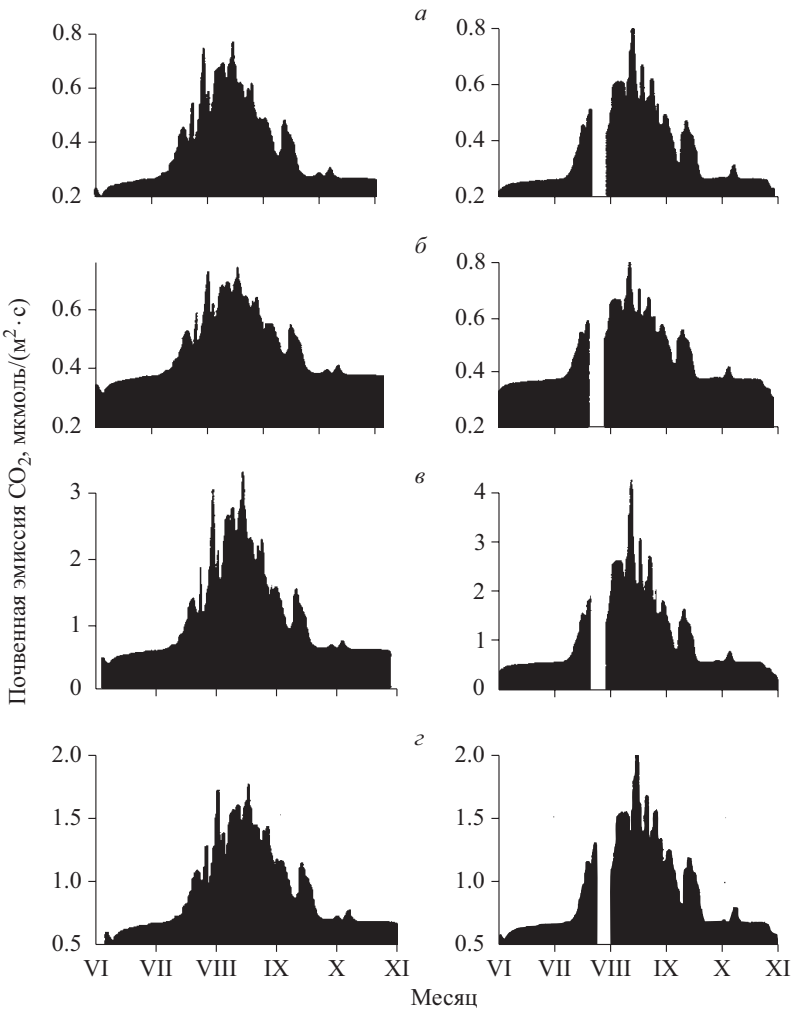

Рис. 8. Моделированный сезонный ход эмиссии CO_2 с поверхности почвы в мохово-лишайниковой каменистой (I) и мохово-осоково-лишайниковой тундре (II) для разных классов напочвенного покрова, где *а* – морозобойные участки почвы, *б* – лишайники, *в* – мхи, *г* – мхи/травы. Пробел в сезонной динамике для участка в мохово-осоково-лишайниковой тундре обусловлен техническими проблемами с регистрацией температуры почвы на АПК.

(0.8 ± 0.2 мкмоль/(м^2 · с)), до существенно более высоких, отмеченных на участках с доминированием осоки (3.6 ± 0.5 мкмоль/(м^2 · с)).

Рассчитанные значения коэффициента температурной зависимости Q_{10} для изученных классов напочвенного покрова составили: 3.77 (R^2 = 0.78) для морозобойных участков почвы, 2.43 (R^2 = 0.72) для лишайниковой растительности, 9.72 (R^2 = 0.84) в моховой синузии и 3.55 (R^2 = 0.56) для мохово-разнотравных участков (Panov et al., 2024). На основе выявленных температурных закономерностей с использованием длительных рядов данных поверхностной температуры почвы с АПК проведено моделирование сезонного хода эмиссионного потока CO_2 в мохово-лишайниковой каменистой и мохово-осоково-лишайниковой тундре для разных классов напочвенного покрова (рис. 8). Ввиду крайне слабых температурных зависимостей или их отсутствия вовсе, для участков в злаково-осоковой тундре моделирование сезонной динамики почвенной эмиссии CO_2 не представлялось возможным.

В целом характерная куполообразная форма сезонного потока CO_2 в бесснежный период (июнь – октябрь) соответствует динамике биогенной активности в районе исследований, с запуском метаболических процессов во II декаде июля и ростом интенсивности почвенного дыхания с достижением им максимальных значений к середине августа. К III декаде сентября наблюдается закономерное снижение скорости потока до существенно более низких значений с даль-

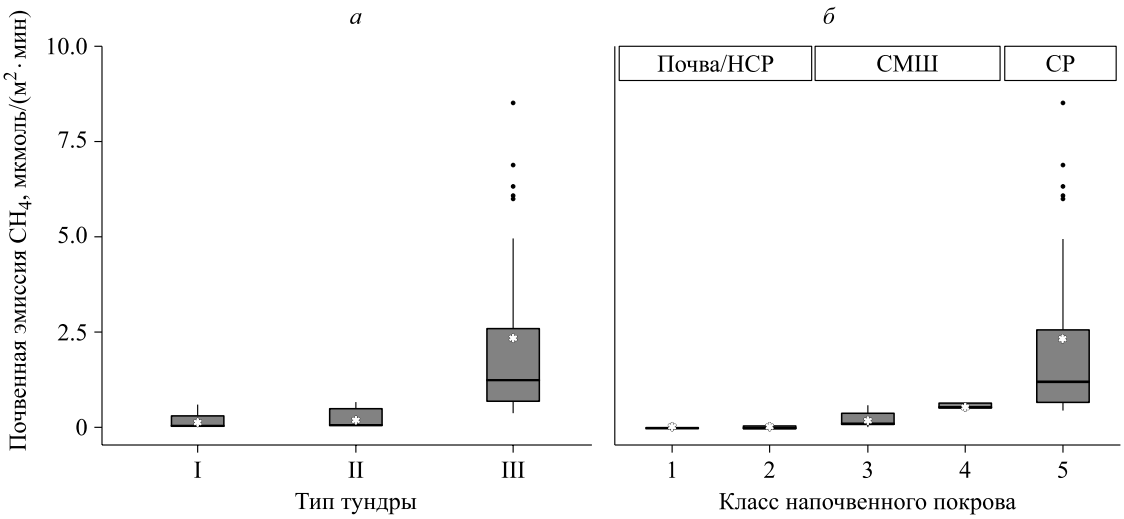

Рис. 9. Почвенная эмиссия CH_4 для мохово-лишайниковой каменистой (I), мохово-осоково-лишайниковой (II) и злаково-осоковой (III) тундр (*а*) и для разных групп (НСР, СМШ, СР) и классов напочвенного покрова, где 1 – морозобойные участки почвы, 2 – мхи/лишайники, 3 – мхи/травы, 4 – мхи/осока, 5 – осока/злаки (*б*).

нейшим переходом экосистемы в период полного физиологического покоя (ноябрь). По абсолютным показателям сезонный ход почвенной эмиссии CO_2 не продемонстрировал существенных различий для разных классов напочвенного покрова между участками в мохово-осоково-лишайниковой и мохово-лишайниковой каменистой типах тундры. В частности, схожие значения потока для разных типов тундры отмечены для морозобойных участков почвы (рис. 8, *а*) и наиболее сухой лишайниковой растительности (рис. 8, *б*). Различия между классами растительного покрова в большей степени проявляются для более увлажненных синузий с преобладанием моховой (рис. 8, *в*) и мохово-травянистой растительности (рис. 8, *г*).

В 2023–2024 гг. оценки почвенной эмиссии CO_2 на тех же стационарных пробных площадках были дополнены измерениями интенсивности выделения CH_4, которые проводились вместе с сопутствующими наблюдениями температуры и влажности почвы на глубине корнеобитаемого слоя (10 см) в разных типах тундры (рис. 9, *а*) и доминирующих классах напочвенного покрова (рис. 9, *б*).

В целом установлено, что значения потока CH_4 с поверхности почвы варьируют в диапазоне от –0.01 (поглощение) до 9.75 (эмиссия) мкмоль/(м^2 · мин), составляя в среднем 0.86 мкмоль/(м^2 · мин) (рис. 9, *а*). Зоны активного выделения метана наблюдались в осоковой и мохово-осоковой синузиях, а незначительного поглощения – на морозобойных участках открытой почвы и в лишайниковых синузиях. Максимальными средними значениями эмиссии метана (2.39 мкмоль/(м^2 · мин)) характеризовались участки увлажненной злаково-осоковой тундры (рис. 9, *б*), тогда как существенно меньшие значения отмечены на более сухих участках мохово-лишайниковой каменистой (0.09 мкмоль/(м^2 · мин)) и мохово-осоково-лишайниковой (0.19 мкмоль/(м^2 · мин)) тундр.

Дополнительно для оценки воздействия антропогенной нагрузки на экосистему тундры, испытывающую значительные нарушения еще со времен освоения Арктики, в вегетационный сезон 2024 г. проведены маршрутные исследования почвенной эмиссии CH_4 на участках вездеходной колеи – ключевого фактора нарушений растительного покрова. Выявлено, что почвенная эмиссия CH_4 составляет здесь в среднем 2.24 мкмоль/(м^2 · мин) (в ~3 раза выше средних «фоновых» значений), варьируя от 0.97 до 2.99 мкмоль/(м^2 · мин) для мохово-осоково-лишайниковой и злаково-осоковой типов тундр соответственно. На свежих нарушенных участках (экспонированная почва) зарегистрированы наибольшие значения эмиссии метана – 1.64 мкмоль/(м^2 · мин) в мохово-осоково-лишайниковой тундре и до 3.32 мкмоль/(м^2 · мин) в злаково-осоковой тундре. На восстановившихся участках эмиссия составила 0.12 и 2.26 мкмоль/(м^2 · мин) для участков в мохово-осоково-лишайниковой и злаково-осоковой типах тундр соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целый ряд документальных свидетельств подтверждает климатические сдвиги и трансформацию природной среды в Арктике, что во многом обусловлено неуклонным ростом концентрации в атмосфере климатически активных (парниковых) газов. Мониторинг их состава и синоптических вариаций в глобальном интеграторе биогеохимических процессов – атмосфере – особенно информативен в контексте оценки состояния природных ландшафтов и регистрации сигналов происходящих изменений совершенно разного характера. Существенно больше информации может дать сопряженный анализ атмосферных сигналов с изучением различных природных объектов и сред, которые непосредственно участвуют в их формировании. Однако, ввиду технической сложности реализации, подобные исследования на территории Российской Арктики единичны и насчитывают всего несколько развернутых инструментальных полигонов. В нашей работе отражены статус, направления и основные результаты комплексных мониторинговых исследований, проводимых специалистами Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН в Арктической зоне Красноярского края на западном побережье п-ова Таймыр (эстуарная зона р. Енисей).

В период круглогодичных прецизионных наблюдений парниковых газов атмосферы с 2018 по 2024 г. отмечен устойчивый прирост атмосферного CO_2 на уровне ~1.9 млн$^{-1}$/год (~0.45 % в год от глобального его содержания в атмосфере). Более низкие темпы прироста диоксида углерода в атмосфере региона исследований (эстуарная зона р. Енисей) по сравнению с подзоной средней тайги могут быть обусловлены влиянием СЛО на формирование атмосферного фона CO_2. Кроме того, в районе исследований выявлен устойчивый ежегодный прирост CH_4 на уровне 12.6 млрд$^{-1}$/год (~0.65 % в год от глобального его содержания в атмосфере), что, наоборот, несколько выше значения 10.2 млрд$^{-1}$/год, фиксируемого на текущий момент в континентальной части региона.

Почвенная эмиссия CO_2 в пик вегетационного сезона в районе исследований в среднем достигает 2.2 ± 1.3 мкмоль/(м^2 · с). В целом отмечен более высокий эмиссионный поток CO_2 с поверхности почвы на участках земель, занятых сосудистыми формами растений (осока, злаки), по сравнению с участками, где преобладают несосудистые растения (лишайники, мхи): 3.6 ± 0.5 и 1.0 ± 0.4 мкмоль/(м^2 · с) соответственно.

Значения эмиссии CH_4 с поверхности почвы варьируют в диапазоне от –0.01 (поглощение) до 9.75 (эмиссия) мкмоль/(м^2 · мин), составляя в среднем 0.86 мкмоль/(м^2 · мин). Выявлены зоны как активного выделения (осоковая и мохово-осоковая синузии), так и незначительного поглощения метана (морозобойные участки почвы, лишайниковая растительность). Средние значения выделения метана выше на участках более увлажненной злаково-осоковой тундры (2.39 мкмоль/(м^2 · мин)), в то время как на участках мохово-лишайниковой тундры отмечены существенно меньшие величины (0.09 мкмоль/(м^2 · мин)). Для живого напочвенного покрова, нарушенного вездеходной техникой, в среднем значение эмиссии CH_4 в ~3 раза выше (2.24 мкмоль/(м^2 · мин)) потока на ненарушенных участках тундры.

Представленные оценки атмосферной динамики парниковых газов – ключевого объекта мониторинга – фиксируют текущий биосферный статус экосистем Арктики, а их сопряженный анализ с данными метеоклиматической информации и структурно-функционального состояния природных объектов позволяет диагностировать изменения природной среды в ответ на климатические сдвиги применительно к физико-географическим, растительным и климатическим условиям региона исследований. Исследования, проводимые на станции DIAMIS, имеют долгосрочную программу развития и необходимы для получения фундаментальной научной информации по оценке состояния северных экосистем и формирования стратегии устойчивого развития Арктической зоны РФ.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки по научному проекту № 24-27-20064.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Г. В., Нагурный А. П. Влияние морского ледяного покрова на концентрацию двуокиси углерода в атмосфере Арктики в зимний период // ДАН. 2005. Т. 401. № 6. С. 817–820.

Ивахов В. М., Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Зинченко А. В., Лоскутова М. А., Макштас А. П., Кустов В. Ю., Лаурила Т., Аурела М., Асми Е. Атмосферная концентрация диоксида углерода на станциях Тикси и Мыс Баранова в 2010–2017 гг. // Метеорол. и гидрол. 2019. №. 4. С. 110–121.

Панов А. В., Прокушкин А. С., Кюблер К., Корец М. А., Урбан А. В., Зражевская Г. К., Бондарь М. Г., Хайманн М., Заале С. Прецизионный мониторинг концентрации диоксида углерода и метана в приземной атмосфере полярного пояса Приенисейской Сибири // Метеорол. и гидрол. 2022. № 11. С. 19–31.

Панов А. В., Махныкина А. В., Урбан А. В., Зырянов В. И., Полосухина Д. А., Кукавская Е. А., Арясов В. Е., Колосов Р. А., Путилин И. Р., Третьяков П. Д., Трусов Д. В., Садыков Р. Т., Прокушкин А. С. Оценка потоков углерода в экосистемах средней тайги Центральной Сибири // Сиб. лесн. журн. 2024. № 3. С. 37–52.

Поддубный В. А., Наговицына Е. С., Маркелов Ю. И., Буевич А. Г., Антонов К. Л., Омелькова Е. В., Манжуров И. Л. Оценка пространственного распределения концентрации метана в районе Баренцева и Карского морей в летний период 2016–2017 гг. // Метеорол. и гидрол. 2020. № 3. С. 77–86.

Тимохина А. В., Прокушкин А. С., Панов А. В., Колосов Р. А., Сиденко Н. В., Лаврич Й., Хайманн М. Межгодовая изменчивость концентрации диоксида углерода над центральной частью Сибири (по данным международной обсерватории ZOTTO за 2009–2015 гг.) // Метеорол. и гидрол. 2018. № 5. С. 20–29.

Урбан А. В., Прокушкин А. С., Корец М. А., Панов А. В., Гербиг К., Хайманн М. Влияние подстилающей поверхности на концентрации парниковых газов в Центральной Сибири // Геогр. и природ. ресурсы. 2019. № 3. С. 32–40.

Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.

Alekseev G. V., Nagurny A. P. Influence of sea ice cover on carbon dioxide concentration in the Arctic atmosphere in the winter period) // Dokl. Earth Sci. 2005. V. 401. N. 3. P. 486–489 (Original Rus. Text © G. V. Alekseev, A. P. Nagurny, 2005, publ. in Doklady Akademii nauk. 2005. V. 401. N. 6. P. 817–820).

Antonov K. L., Poddubny V. A., Markelov Y. I., Buevich A. G., Medvedev A. N. Dynamics of surface carbon dioxide and methane concentrations on the Arctic Belyy Island in 2015–2017 summertime // Proc. SPIE: 24th Int. Symp. Atmosph. and Ocean Optics: Atmosph. Phys. 2018. V. 10833. P. 1379–1384.

Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Khvostikov S. A. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sens. Lett. 2014. V. 5. N. 1. P. 55–64.

Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming // J. Clim. 2010. V. 23. N. 14. P. 3888–3906.

Belikov D., Arshinov M., Belan B., Davydov D., Fofonov A., Sasakawa M., Machida T. Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO_2 and CH_4 at tower network in Siberia from 2005 to 2016 // Atmosphere. 2019. V. 10. N. 11. Article number 689. 18 p.

Berner L. T., Massey R., Jantz P., Forbes B. C., Macias-Fauria M., Myers-Smith I., Kumpula T., Gauthier G., Andreu-Hayles L., Gaglioti B. V., Burns P., Zetterberg P., D'Arrigo R., Goetz S. J. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome // Nat. Commun. 2020. V. 11. Article number 4621. 12 p.

Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K., Comiso J. C., Epstein H. E., Jia G., Gens R., Pinzon J. E., Tucker C. J., Tweedie C. E., Webber P. J. Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea ice decline // Earth Interact. 2010. V. 14. N. 8. P. 1–20.

Blunden J., Arndt D. S. State of the climate in 2018 // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2019. V. 100. N. 9. P. Si–S306.

Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., Sokolova N., Bukhanov B. Evidence of gas emissions from permafrost in the Russian Arctic // Geosciences. 2020. V. 10. N. 383. P. 1–23.

Dolman A. J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchebakova N., Chen T., Molen M. K. van der, Belelli Marchesini L., Maximov T. C., Maksyutov S., Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosciences. 2012. V. 9. N. 12. P. 5323–5340.

Ferrada G. A., Zhou M., Wang J., Lyapustin A., Wang Y., Freitas S. R., Carmichael G. R. Introducing the VIIRS-based Fire Emission Inventory version 0 (VFEIv0) // Geosci. Model Dev. 2022. V. 15. P. 8085–8109.

Fraser R. H., Lantz T. C., Olthof I., Kokelj S. V., Sims R. A. Warming-induced shrub expansion and lichen decline in the Western Canadian Arctic // Ecosystems. 2014. V. 17. N. 7. P. 1151–1168.

Friedlingstein P., Meinshausen M., Arora V. K., Jones C. D., Anav A., Liddicoat S. K., Knutti R. Uncertainties in CMIP5 climate projections due to carbon cycle feedbacks // J. Climate. 2014. V. 27. N. 2. P. 511–526.

Hayes D. J., Kicklighter D. W., McGuire A. D., Chen M., Zhuang Q., Yuan F., Melillo J. M., Wullschleger S. D. The impacts of recent permafrost thaw on land-atmosphere greenhouse gas exchange // Environ. Res. Lett. 2014. V. 9. N. 4. P. 1–12.

Heintzenberg J., Birmili W., Otto R., Andreae M. O., Mayer J.-C., Chi X., Panov A. Aerosol particle number size distributions and particulate light absorption at the ZOTTO tall tower (Siberia), 2006–2009 // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. N. 1. P. 8703–8719.

Hinzman L. D., Deal C. J., McGuire A. D., Mernild S. H., Polyakov I. V., Walsh J. E. Trajectory of the Arctic as an integrated system // Ecol. Appl. 2013. V. 23. N. 8. P. 1837–1868.

Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E. A. G., Ping C.-L., Schirrmeister L., Grosse G., Michaelson G. J., Koven C. D., O'Donnell J. A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., Kuhry P. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // Biogeosciences. 2014. V. 1. N. 23. P. 6573–6593.

IPCC: The ocean and cryosphere in a changing climate, 2019. https://www.ipcc.ch/srocc/home/

Ivakhov V. M., Paramonova N. N., Privalov V. I., Zinchenko A. V., Loskutova M. A., Makshtas A. P., Kustov V. Y., Laurila T., Aurela M., Asmi E. Atmospheric concentration of carbon dioxide at Tiksi and Cape Baranov stations in 2010–2017 // Rus. Meteorol. Hydrol. 2019. V. 44. N. 4. P. 291–299 (Original Rus. Text © V. M. Ivakhov, N. N. Paramonova, V. I. Privalov, A. V. Zinchenko, M. A. Loskutova, A. P. Makshtas, V. Y. Kustov, T. Laurila, M. Aurela, E. Asmi, 2019, publ. in Meteorologiya i Gidrologiya. 2019. N. 4. P. 110–121).

McGuire A. D., Anderson L. G., Christensen T. R., Dallimore S., Guo L., Hayes D. J., Heimann M., Lorenson T. D., Macdonald R. W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // Ecol. Monogr. 2009. V. 79. N. 4. P. 523–555.

McGuire A. D., Christensen T. R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J. S., Koven C., Lafleur P., Miller P. A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: Comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions // Biogeosciences. 2012. V. 9. N. 8. P. 3185–3204.

McKnight T. L., Hess D. Physical geography: A landscape appreciation. Virtual field trip edition. Sixth ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J., USA, 2000.

Montzka S. A., Krol M., Dlugokencky E., Hall B., Jöckel P., Lelieveld J. Small interannual variability of global atmospheric hydroxyl // Science. 2011. V. 331. N. 6013. P. 67–69.

Panov A., Prokushkin A., Semiletov I., Kübler K., Korets M., Putilin I., Urban A., Bondar M., Heimann M. Atmospheric CO_2 and CH_4 fluctuations over the continent-sea interface in the Yenisei River sector of the Kara Sea // Atmosphere. 2022*a*. V. 13. Iss. 9. Article number 1402.

Panov A. V., Prokushkin A. S., Kubler K., Korets M. A., Urban A. V., Zrazhevskaya G. K., Bondar' M. G., Heimann M., Zaehle S. Precisious observations of atmospheric carbon dioxide and methane mole fractions in the polar belt of near-Yenisei Siberia // Rus. Meteorol. Hydrol. 2022*b*. V. 47. N. 11. P. 829–838 (Original Rus. Text © A. V. Panov, A. S. Prokushkin, K. Kubler, M. A. Korets, A. V. Urban, G. K. Zrazhevskaya, M. G. Bondar', M. Heimann, S. Zaehle, 2022, publ. in Meteorologiya i Gidrologiya. 2022. N. 11. P. 19–31).

Panov A., Prokushkin A., Korets M., Putilin I., Zrazhevskaya G., Kolosov R., Bondar M. Variation in soil CO_2 fluxes across land cover mosaic in typical tundra of the Taimyr Peninsula, Siberia // Atmosphere. 2024. V. 15. N. 6. Article number 698. 20 p.

Park T., Ganguly S., Tømmervik H., Euskirchen E. S., Høgda K. A., Karlsen S. R., Brovkin V., Nemani R. R., Myneni R. B. Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data // Environ. Res. Lett. 2016. V. 11. N. 8. Article number 084001. 12 p.

Poddubny V., Nagovitsyna E., Antonov K., Markelov J., Buevich A., Omelkova E., Manzhurov I., Medvedev A., Vasil'eva J. Estimation of the atmospheric greenhouse gas spatial distribution in the Arctic using a back trajectory model // Math. Meth. Appl. Sci. 2020*a*. V. 43. N. 13. P. 7657–7663.

Poddubny V. A., Nagovitsyna E. S., Markelov Yu. I., Buevich A. G., Antonov K. L., Omel'kova E. V., Manzhurov I. L. Estimation of the spatial distribution of methane concentration in the area of the Barents and Kara seas in summer in 2016–2017 // Rus. Meteorol. Hydrol. 2020*b*. V. 45. N. 3. P. 193–200 (Original Rus. Text © V. A. Poddubny, E. S. Nagovitsyna, Yu. I. Markelov, A. G. Buevich, K. L. Antonov, E. V. Omel'kova I. L. Manzhurov, 2020, publ. in Meteorologiya i Gidrologiya. 2020. N. 3. P. 77–86).

Reum F., Göckede M., Lavric J. V., Kolle O., Zimov S., Zimov N., Pallandt M., Heimann M. Accurate measurements of atmospheric carbon dioxide and methane mole fractions at the Siberian coastal site Ambarchik // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12. N. 11. P. 5717–5740.

Richter-Menge J., Druckenmiller M. L., Jeffries M. Arctic report card: Update for 2019. https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019

Schuur E. A. G., McGuire A. D., Schadel C., Grosse G., Harden J. W., Hayes D. J., Hugelius G., Koven C. D., Kuhry P., Lawrence D. M., Natali S. M., Olefeldt D., Romanovsky V. E., Schaefer K., Turetsky M. R., Treat C. C., Vonk J. E. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. V. 520. P. 171–179.

Serreze M. C., Walsh J. E., Chapin F. S., Osterkamp T., Dyurgerov M., Romanovsky V., Oechel W. C., Morison J., Zhang T., Barry R. G. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment // Clim. Change. 2000. V. 46. N. 1. P. 159–207.

Timokhina A. V., Prokushkin A. S., Panov A. V., Kolosov R. A., Sidenko N. V., Lavrich J., Heimann M. Interannual variability of atmospheric CO_2 concentrations over Central Siberia from ZOTTO data for 2009–2015 // Rus. Meteorol. Hydrol. 2018. V. 43. N. 5. P. 288–294 (Original Rus. Text © A. V. Timokhina, A. S. Prokushkin, A. V. Panov, R. A. Kolosov, N. V. Sidenko, J. Lavrich, M. Heimann, publ. in Meteorologiya i gidrologiya. 2018. N. 5. P. 20–29).

Urban A. V., Prokushkin A. S., Korets M. A., Panov A. V., Gerbig K., Hajmann M. Influence of the underlying surface on greenhouse gas concentrations in the atmosphere over Central Siberia // Geogr. Nat. Res. 2019. V. 40. N. 3. P. 221–229 (Original Rus. Text © A. V. Urban, A. S. Prokushkin, M. A. Korets, A. V. Panov, K. Gerbig, M. Hajmann, 2019, publ. in Geografiya i prirodnye resursy. 2019. V. 40. N. 3. P. 32–40).

Walker D. A., Raynolds M. K., Daniëls F. J. A., Einarsson E., Elvebakk A., Gould W. A., Katenin A. E., Kholod S. S., Markon C. J., Melnikov E. S., Moskalenko N. G., Talbot S. S., Yurtsev B. A. The other members of the CAVM Team. The Circumpolar Arctic vegetation map // J. Veg. Sci. 2005. V. 16. N. 3. P. 267–282.

Winderlich J., Chen H., Gerbig C., Seifert T., Kolle O., Lavric J. V., Kaiser C., Hofer A., Heimann M. Continuous low-maintenance $CO_2/CH_4/H_2O$ measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. N. 4. P. 1113–1128.

STATIONARY STUDIES CONCENTRATIONS AND FLUXES OF GREENHOUSE GASES IN TUNDRA ECOSYSTEMS OF THE TAIMYR PENINSULA

A. V. Panov[1], A. S. Prokushkin[1, 2], E. A. Kukavskaya[1], I. R. Putilin[1], E. A. Anuev[1], M. A. Korets[1], V. E. Aryasov[1], R. A. Kolosov[1], M. G. Bondar[3]

[1] *V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch*
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

[2] *Siberian Federal University, Institute of Ecology and Geography*
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

[3] *United Directorate of Taimyr Nature Reserves*
Kirova str., 24, Norilsk, Krasnoyarsk Krai, 663305 Russian Federation

E-mail: alexey.v.panov@gmail.com, prokushkin@ksc.krasn.ru, kukavskaya@ksc.krasn.ru, irputilin@mail.ru, djekizion@mail.ru, mik@ksc.krasn.ru, vova_aryasov@mail.ru, kolosov.ra@ksc.krasn.ru, mikisayan@ya.ru

The Arctic is one of the most climate-vulnerable regions of the planet, where the rate of temperature increase is twice as high as the global average. The rapid increase in temperature is largely due to the increasing concentration of greenhouse gases in the atmosphere. Forecasts indicate that the continuation of this trend may lead to a large-scale release of carbon accumulated in permafrost. The scale and duration of the expected effect are not obvious due to the poorly developed monitoring of greenhouse gases in the Russian Arctic: sporadic estimates of their atmospheric variations and exchange with ecosystems. The paper presents the results of studies of the dynamics of atmospheric greenhouse gases in the estuarine zone of the Yenisei River, indicating a stable annual increase in CO_2 (~1.9 million^{-1}/year) and CH_4 (~12.6 milliard^{-1}/year). The values of soil emissions of these gases for different types of tundra and vegetation on the western coast of the Taimyr Peninsula are presented, where it is shown that the highest values are typical for areas with vascular plant forms. Disturbances of the living ground cover by all-terrain vehicles lead, on average, to a threefold increase in methane emissions into the atmosphere.

Keywords: *Arctic, atmosphere, climate, carbon dioxide, methane, carbon fluxes.*

How to cite: *Panov A. V., Prokushkin A. S., Kukavskaya E. A., Putilin I. R., Anuev E. A., Korets M. A., Aryasov V. E., Kolosov R. A., Bondar M. G.* Stationary studies concentrations and fluxes of greenhouse gases in tundra ecosystems of the Taimyr Peninsula // *Sibirskij Lesnoj Zurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2025. N. 4. P. 13–27 (in Russian with English abstract and references).