научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

Издатель
ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

http://ecopri/ru

№ 3 (61). Сентябрь, 2026

Главный редактор
А. В. Коросов

Редакционный совет
В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия
Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugołek
В. Н. Якимов
А. В. Сонина

Службы поддержки
Н. А. Марфицына
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465
Адрес редакции
185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453
E-mail: ecopri@psu.karelia.ru
http://ecopri/ru

12+

© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 551.510.411

СЕЗОННАЯ И ВЕРТИКАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА НАД МЕРЗЛОТНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

АЛЕКСЕЕВА Александра Васильевна — *Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск, ул. Петровского, 2, aav1312@mail.ru*

ПЕТРОВ Роман Егорович — *кандидат биологических наук, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, пр. Ленина, 41, pre2003@mail.ru*

ГРИГОРЬЕВ Марат Робертович — *Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, пр. Ленина, 41, eidosmarat@mail.ru*

МОРДОВСКОЙ Петр Григорьевич — *кандидат технических наук, Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск, ул. Петровского, 2, mordovskoipg@yandex.ru*

МАКСИМОВ Трофим Христофорович — *доктор биологических наук, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, пр. Ленина, 41, tcmax@mail.ru*

Ключевые слова:
атмосфера
метан
Сибирь
Якутия
многолетняя мерзлота
мерзлотные экосистемы
самолетные наблюдения

Аннотация: Актуальность мониторинга метана в атмосфере обусловлена его высокой климатической значимостью, особенно для регионов криолитозоны, где содержатся огромные запасы углерода. Деградация многолетней мерзлоты и расширение термокарстовых озер могут приводить к дополнительной эмиссии метана, усиливая парниковый эффект. В статье исследуются сезонные колебания, вертикальное распределение и временные изменения содержания метана над Центральной Якутией. Характерная особенность исследуемого региона позволяет рассматривать годовую динамику в рамках двух основных периодов – теплого с активной вегетацией и холодного с подавленными биологическими процессами. Наземные и самолетные измерения концентрации метана проводились на пяти высотах от 34 м до 3000 м с 2017 по 2021 г. над научной станцией «Спасская падь». Установлено, что в исследуемый период средняя концентрация метана в холодный сезон (октябрь – март) составила 1996 ppb, что на 22 ppb выше, чем в теплый сезон – 1974 ppb (апрель – сентябрь). При этом в летний период наблюдается ярко выраженный максимум в приземном слое на высоте 34–100 м, тогда как зимой распределение по высоте более однородно. За исследуемый период наблюдается рост содержания метана в атмосфере. Локальные концентрации над Центральной Якутией стабильно превышают глобальные фоновые значения в среднем на 6 %, что указывает на значительный вклад региональных природных и антропогенных источников. Полученные данные самолетных наблюдений концентрации метана на различных высотах важны для оценки вклада мерзлотных экосистем в глобальный бюджет метана.

© Петрозаводский государственный университет
©Алексеева А. В., Петров Р. Е., Григорьев М. Р., Мордовской П. Г., Максимов Т. Х.

Получена: 26 марта 2026 года **Подписана к печати**: 29 сентября 2026 года

Введение

Изменения климата привели к быстрым изменениям окружающей среды в регионах многолетней мерзлоты. По прогнозам МГЭИК, в будущем ожидается продолжение глобального потепления (IPCC, 2023). Повышение температуры может иметь важные последствия для стабильности многолетнемерзлых почв, в которых, как считается, хранится в два раза больше углерода, чем в настоящее время в атмосфере (Schuur et al., 2022; Biskaborn et al., 2019). Особо значимы сибирские мерзлотные почвы с их огромными запасами органического углерода (Dolman et al., 2012; Шепелев и др., 2024). Поскольку разложение органического вещества в значительной степени определяется состоянием многолетней мерзлоты, существует риск, что при ее оттаивании большая часть хранящегося углерода высвободится в атмосферу (Zhang et al., 2023; Mu et al., 2020; Blok et al., 2010; Максимов, 2007). Таким образом будут запущены процессы обратных связей между климатическими изменениями и высвобождением почвенного углерода (Wang et al., 2024; Natali et al., 2015).

В бассейне реки Лена на протяжении тысячелетий накапливались значительные запасы углерода в озерных отложениях, а также в почвах водно-болотных угодий, лесов и тундры. Этому способствовали низкие температуры в северных широтах, которые подавляют разложение органического вещества микроорганизмами (Delwiche et al., 2021). За последние 60 лет среднегодовая температура воздуха в Центральной Якутии повысилась на 2.9 °C (Desyatkin et al., 2025). При этом, согласно детальному анализу данных 18 метеорологических станций, наиболее быстрые темпы прироста отмечаются в весенний и осенний сезоны (Salehnia et al., 2025). С потеплением климата и деградацией мерзлоты законсервированный углерод становится уязвимым. В осадочных низменностях с многолетней мерзлотой образуются термокарстовые (аласные) озера, расширение этих озер приводит к увеличению эмиссии углерода в виде метана. Проведенные на территории Якутии исследования позволили установить, что «горячими точками» положительного потока CH4 также являются эвтрофные озера и их берега (van Huissteden et al., 2008, 2011).

Исследования на станции «Спасская падь» выявили, что лесные участки демонстрируют отрицательные потоки метана, что свидетельствует о поглощении CH4 из атмосферы метанотрофными организмами (van Huissteden et al., 2008). В свою очередь, Карсанаев и соавторы (2022) в результате камерных измерений потоков метана в тундровых экосистемах севера Якутии установили, что в мерзлотных экосистемах важную роль играют сфагновые мхи (Sphagnum sp.). Метанотрофные организмы в симбиозе со сфагнумом обеспечивают снижение общего выброса метана на 50 %. Учитывая широкое распространение сфагновых мхов в лесах Центральной Якутии, можно предположить, что аналогичный механизм играет роль и в районе исследования.

Возрастающий интерес к концентрации метана в атмосфере обусловлен тем, что скорость роста концентрации метана примерно в 2–4 раза выше, чем у CO2. Это ставит метан на второе место по значимости после углекислого газа (Семилетов, Шахова, 2024). По данным GML NOAA, в ноябре 2025 г. среднемесячное значение составило 1945.85 ppb (NOAA GML, 2026). По сравнению с доиндустриальным уровнем CH4 ~722 ppb в 1750 г. (IPCC, 2021) рост концентрации в атмосфере составляет более чем в два раза.

В связи с климатической значимостью метана и необходимостью оценки вклада сибирских экосистем в глобальный углеродный баланс в Якутии были проведены самолетные исследования в рамках проекта JR-Station. Общие принципы организации измерений сети наблюдений представлены в работах Sasakawa et al. (2010, 2025). Результаты программы над территорией Сибири представлены в работах Аршинова и соавт. (2018), Антохиной и соавт. (2019), Антоновича и соавт. (2022), Belikov et al. (2019).

Несмотря на активные исследования потоков метана на поверхности и наличие данных для некоторых регионов Сибири, систематические наблюдения над вертикальным распределением метана в атмосфере над Центральной Якутией остаются крайне ограниченными. Такие данные позволят определить региональный вклад мерзлотных экосистем в глобальный бюджет метана, а также верифицировать модели переноса парниковых газов. Цель настоящей работы заключается в анализе данных концентрации метана в атмосфере над Центральной Якутией, полученных в ходе самолетных измерений в 2017–2021 гг., для характеристики сезонной динамики, вертикального распределения, изменения концентрации за исследуемый период и сравнения локальных концентраций с глобальным фоном.

Материалы

Объектом исследования является содержание метана в атмосфере над мерзлотными ландшафтами Центральной Якутии. Для определения условий формирования наблюдаемых концентраций метана далее приводится характеристика региона. Растительность региона представлена сочетанием хвойных, мелколиственных лесов, кустарниковых зарослей, луговых сообществ и сельскохозяйственных угодий (Ефимова, 2011). Климатические особенности определяются географическим положением, образованием зимой мощного антициклона, свободным вторжением арктического воздуха, малой доступностью теплых и влажных воздушных масс с востока и юга, а также сложным рельефом (Чевычелов и др., 2022). Засушливый климат способствует развитию в Якутии аласных ландшафтов, формирующих замкнутые экосистемы. Площадь активных термокарстовых впадин (аласов) в Центрально-Якутской низменности составляет около 20–30 % от всей ее территории (Desyatkin et al., 2023). Согласно Соловьеву (1973, цит. по Desyatkin et al., 2025), территория находится в зоне сплошной многолетней мерзлоты мощностью от 10–50 до 400 м и более. В современных исследованиях отмечается, что повышающаяся из года в год температура воздуха усиливает прогревание сезонно-талого слоя почвы и увеличивает глубину протаивания (Desyatkin et al., 2025; Tei et al., 2013). Водная сеть представлена рекой Леной, ее притоками, а также малыми и средними реками, чей сток изменился за последние десятилетия в связи с изменением климата (Andreeva, Lebedeva, 2025). В Якутии термокарстовые озера составляют около 80 % всех озер. За 2000–2019 гг. их площадь в бассейнах рек Суола и Таатта увеличилась в два раза, что, скорее всего, связано с активацией криогенных процессов (Нестерова и др., 2021).

Самолетный мониторинг проводился над лесной научной станцией «Спасская падь», расположенной в 30 км к северу от г. Якутска, на левом берегу реки Лена. Высота местности составляет около 220 м. Станция основана в 1952 г., находится в ведении Института биологических проблем криолитозоны СО РАН с 1992 г. На станции ведутся исследования по физиологии и биохимии растений, метеорологии и почвоведению. Общая площадь исследуемой территории составляет 441 га, где доминируют сухие лиственничные леса, озера встречаются локально. Территория лесного стационара типична для равнинных лесов Центральной Якутии. Типы леса представлены здесь брусничными лиственничниками (Laricetum vacciniosum), толокнянковыми сосняками (Pinetum arctostaphylosum) и разнотравными березняками (Betuletum mixtoherbosum). Основная лесообразующая порода на станции – лиственница Гмелина – Каяндера (*Larix gmelinii/Larix cajanderi*) (89 %), также встречаются сосна (2 %) и береза (9 %). Возраст лиственниц первого яруса составляет 170–180 лет, высота деревьев 18–20 м. Во втором ярусе произрастают молодняк лиственницы, береза и шиповник (Оконешникова и др., 2018; Ohta et al., 2001). Особенностью возрастной структуры лесных экосистем на станции «Спасская падь» является преобладание спелых и перестойных древостоев, на долю которых приходится 65 % (Максимов, 2007). Почвообразующими породами под лиственничными лесами «Спасской пади» служат песчано-суглинистые карбонатные отложения (Оконешникова и др., 2018).

Методы

Измерения концентрации над научной станцией «Спасская падь» (Центральная Якутия) проводились каждый месяц в дневное время с помощью самолетного мониторинга на высотах 500–3000 м. В те же дни выполнялся отбор проб воздуха с метеорологической вышки высотой 34 м. На каждой высоте образцы воздуха отбирались поршневым насосом в стеклянные колбы объемом 1 литр, которые предварительно продувались около минуты. Результаты определялись на газовом хроматографе GC-8A, Shimadzu (Япония).

За период 2017–2021 гг. общий объем выборки составил 40 измерений: 24 измерения в теплый период (апрель – сентябрь) и 16 измерений в холодный период (октябрь – март). Основным ограничением является неравномерное распределение измерений по сезонам. Отсутствие измерений в отдельные месяцы также может влиять на репрезентативность сезонных средних. Тем не менее распределение измерений в целом охватывает ключевые месяцы каждого сезона, что позволяет считать полученные результаты адекватными. Статистическая обработка выполнена с применением методов описательной статистики (расчет средних арифметических, минимальных и максимальных значений) и анализа временных рядов (оценка

темпа роста концентраций за исследуемый период). Данные обработаны в Excel и визуализированы в среде Phyton.

Результаты

Данные концентрации метана на высотах от 34 до 3000 м над Центральной Якутией за 2017–2021 гг. представлены на рис. 1. Диапазон средних значений по всем высотам варьирует в пределах 1920–2060 ppb.

Концентрация метана демонстрирует сезонный ход: минимальные значения фиксируются в теплый период, максимальные – в холодный. Снижение концентрации метана начинается весной (апрель) и достигает минимума в мае – июне в пределах 1920–1990 ppb. Теплый период длится до конца сентября, далее средние значения концентрации возрастают и достигают максимума в диапазоне 1970–2060 ppb в разные месяцы холодного периода.

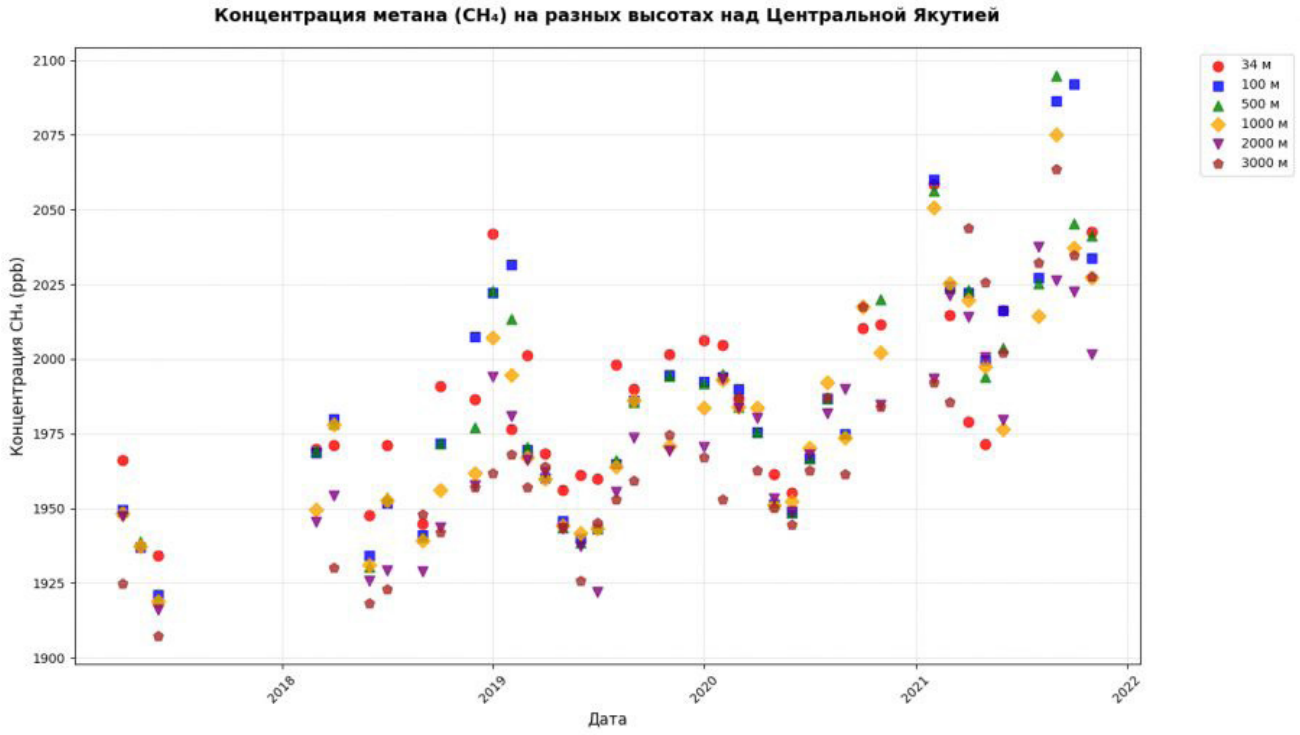


Рис. 1. Динамика концентрации метана на разных высотах (34–3000 м) над Центральной Якутией за 2017–2021 гг.

Fig. 1. The dynamics of methane concentration at different altitudes (34–3000 m) over Central Yakutia for 2017–2021

Анализ временного ряда за 2017–2021 гг. выявил общий рост средних концентраций метана на 92.7 ppb, среднегодовой прирост составил 18.5 ppb. Прирост средних значений концентрации метана отмечается как в теплый период, так и в холодный (табл. 1). В теплый период темп прироста составил 4.5 % (более 80 ppb), опережая холодный период с темпом 3.3 % (более 60 ppb). В 2021 г. фиксируется значительный прирост относительно 2020 г.: +54 ppb в теплый период и +37 ppb в холодный период, что в 2–3 раза превышает среднегодовые значения предыдущих лет.

Таблица 1. Средние концентрации метана по годам и сезонам, ppb

	Теплый период (ppb)	Холодный период (ppb)	Разница (ppb)
2017	1934.9	–	–
2018	1945.9	1965.9	+20.0
2019	1956.6	1989.6	+33.1
2020	1967.9	1995.1	+27.3
2021	2022.2	2031.6	+9.4

При анализе вертикального распределения метана (рис. 2) выявлено, что в исследуемый период максимальные значения концентрации метана фиксируются на высотах 34 м и 100 м (26 измерений из 40 наблюдений), большей частью на высоте 34 м. При этом диапазон значений широкий. С увеличением высоты концентрация метана снижается и становится более стабильной. Минимальные концентрации метана фиксируются на высоте 2000–3000 м (33 измерения из 40 наблюдений). Такая картина наблюдается как в теплый, так и в холодный период. Белые ячейки на рис. 2 соответствуют отсутствию данных.

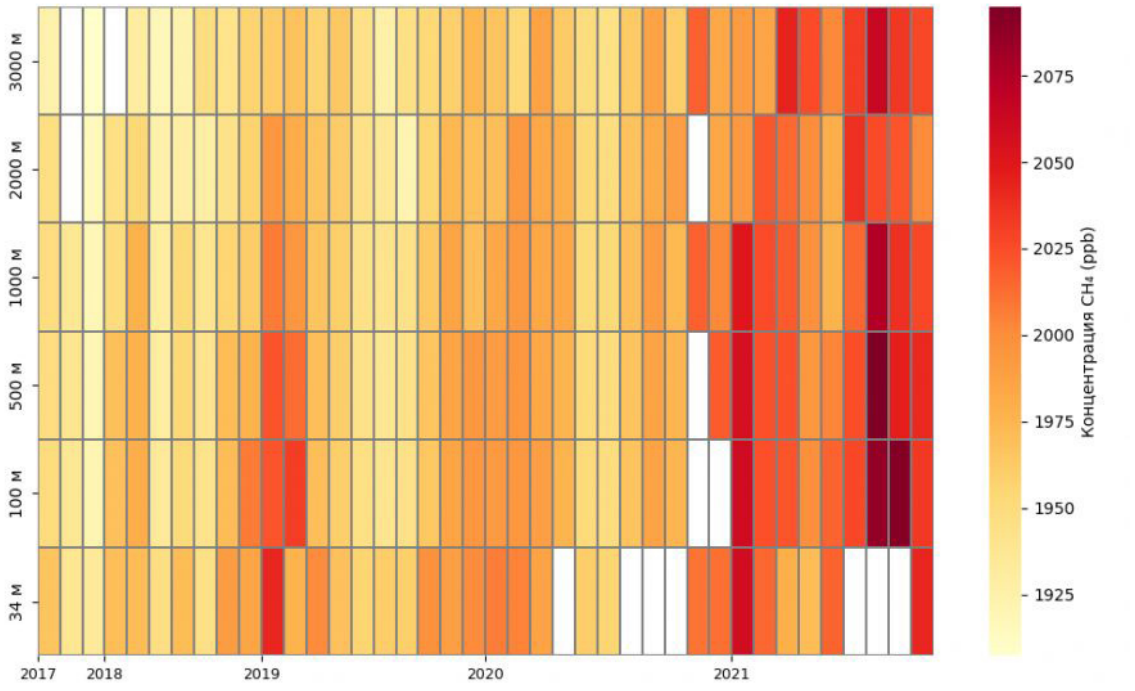


Рис. 2. Вертикальное распределение метана на высотах 34–3000 м за 2017–2021 гг.
Fig. 2. Vertical distribution of methane at altitudes of 34–3000 m for the period 2017–2021

За исследуемый период минимальная концентрация 1907.3 ppb зафиксирована на высоте 3000 м в июне 2017 г. Максимальное значение отмечено на высоте 500 м, оно составило 2094.9 ppb в сентябре 2021 г. Отсутствие измерений на высоте 34 м в сентябре 2021 г. не позволяет сопоставить значение на высоте 500 м с приземным слоем в этот период.

В табл. 2 приведены средние значения концентрации метана в Якутии и глобальные фоновые данные NOAA Global Monitoring Laboratory (gml.noaa.gov) за июнь и ноябрь 2017–2021 гг. Ноябрьские концентрации выше июньских в обоих наборах данных. Отсутствие данных за ноябрь 2017–2018 гг. в Якутии ограничивает анализ, но имеющиеся данные показывают, что локальные концентрации метана в Якутии выше глобальных фоновых значений (NOAA). В июне это превышение составляет около 80–111 ppb, в ноябре – 100–120 ppb. При этом в 2021 г. резко сократилась амплитуда между зимними и летними значениями – с 43.5 ppb в 2019 г. до 29.9 ppb в 2021 г.

Таблица 2. Средние значения концентрации метана по данным станции «Спасская падь» и фонового мониторинга GML NOAA, ppb

	Данные станции «Спасская падь»	Данные GML NOAA		Данные станции «Спасская падь»	Данные GML NOAA
Июнь 2017	1919.6	1842.9	Ноябрь 2017	–	1858.6
Июнь 2018	1931.2	1851.9	Ноябрь 2018	–	1866.2
Июнь 2019	1940.7	1858.6	Ноябрь 2019	1984.2	1875.6
Июнь 2020	1949.7	1871.9	Ноябрь 2020	2000.4	1891.5
Июнь 2021	1999.1	1888.1	Ноябрь 2021	2029.0	1909.2

Обсуждение

Полученные данные показывают устойчивый сезонный ход концентрации метана, минимальные значения фиксируются в теплый период (апрель – сентябрь), максимальные – в холодный (октябрь – март). Летнее снижение концентрации метана над Центральной Якутией может быть обусловлено деятельностью метанотрофных организмов в лиственничных лесах (van Huissteden et al., 2008) и сфагновыми мхами (Карсанаев и др., 2022). В зимний период при отсутствии биологической активности в районе исследования преобладающее значение приобретают антропогенные источники. К аналогичному выводу о доминировании антропогенных источников в холодное время года приходят и авторы исследований в арктической зоне (Панов и др., 2022).

Сезонная амплитуда составляет 20–30 ppb (2018–2020 гг.), что значительно ниже значений, характерных для Западной Сибири. По данным Аршинова и соав. (2009), амплитуда годового хода метана в Западной Сибири превышает 100 ppb и может достигать 200 ppb. Это различие объясняется преобладанием в Центральной Якутии сухих лиственничных лесов и незначительной долей термокарстовых и эвтрофных озер. В зимний период происходит накопление метана в условиях зимней инверсии, антициклона и слабого ветра. В 2021 г. отмечаются максимальные значения концентрации метана в атмосфере за весь исследуемый период и резкое сокращение сезонной амплитуды. Это может быть связано с резким ростом лесных пожаров. По данным Рослесхоза, площадь лесных пожаров в 2021 г. была рекордной за последние более 10 лет (Андреев, 2021) и составила около 8 млн га, тогда как в 2019 г. – 3.9 млн га (https://rosleshoz.gov.ru/rates/forest-fires/area/).

Анализ вертикального профиля позволяет выделить два характерных слоя. В приземном слое (34–100 м) концентрация метана максимальна и наиболее изменчива, что указывает на определяющую роль локальных процессов. С увеличением высоты концентрация снижается и становится более стабильной, достигая минимальных значений на высотах 2000–3000 м, где доминируют фоновые значения, формируемые глобальными атмосферными процессами. Эти результаты согласуются с данными самолетного зондирования над Западной Сибирью, в ходе которого также отмечены снижение и сглаживание концентрации метана с высотой (Антохина и др., 2019).

Ветровой режим в районе исследований также вносит вклад в сезонную изменчивость концентрации метана в атмосфере. По данным датчика ветра Vaisala (Финляндия), установленного на станции «Спасская падь», за 2018–2021 гг. в холодный период устойчиво преобладали ветры северо-западного направления (47 %). В теплый период доля северо-западного сектора снизилась до 31 %, при этом доля юго-восточного возросла до 27 %. Средняя скорость ветра в холодный период составила 1.7 м/с, в теплый – 2.17 м/с. Доля слабого ветра менее 1.5 м/с зимой составила 50 % против 35 % летом. В холодный период скорость ветра >2.5 м/с зарегистрирована в 19 % случаев, тогда как в теплый почти в два раза чаще. Таким образом, в теплый период движения воздушных масс более изменчивы и скорость выше, что способствовало рассеиванию метана. В холодный период сочетание устойчивого северо-западного переноса с преобладанием слабых ветров создало благоприятные условия для накопления метана в приземном слое (рис. 3, табл. 3).

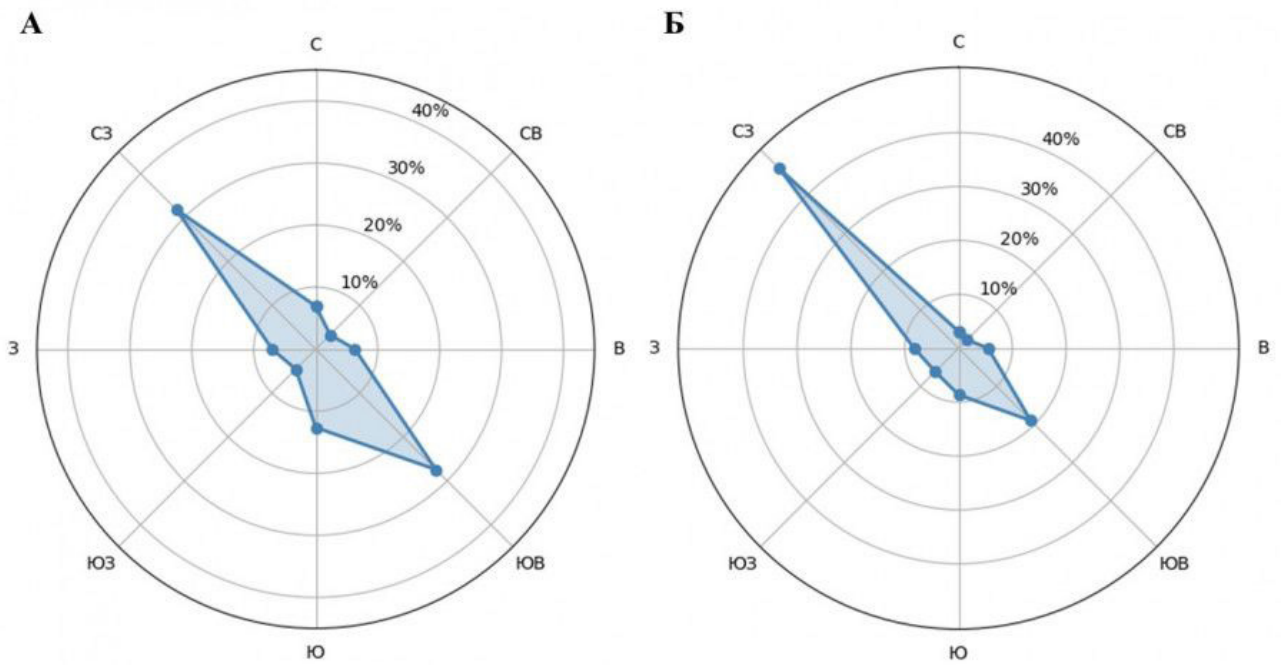


Рис. 3. Роза ветров теплого (А) и холодного (Б) периодов 2018–2021 гг.
Fig. 2. Wind rose for the warm (А) and cold (Б) periods of 2018-2021.

Таблица 3. Распределение направлений ветра (%) по сезонам за 2018–2021 гг.

	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Холодный период	3.1	2.2	5.5	19.0	8.6	6.1	8.3	47.1
Теплый период	6.9	3.3	6.3	27.4	12.6	4.6	7.0	31.8

За исследуемый период 2017–2021 гг. анализ полученных самолетных данных над научной станцией «Спасская падь» (Центральная Якутия) выявлен устойчивый рост концентрации метана, что согласуется с глобальным трендом NOAA. При этом локальные концентрации превышают фоновые, что указывает на вклад региональных природных источников, таких как водно-болотные угодья (East et al., 2024) и деградация мерзлоты. Прогнозируемое расширение термокарстовых озер, как показано в работах для территории Якутии, будет серьезно влиять на экосистемы многолетней мерзлоты и инфраструктуру региона (van Huissteden et al., 2011).

Заключение

Полученные результаты восполняют пробел в данных о временном и вертикальном распределении метана в атмосфере над Центральной Якутией и позволяют количественно оценить региональные особенности, скрытые при глобальном усреднении. Они создают основу для дальнейших исследований, направленных на разделение природных и антропогенных составляющих регионального бюджета метана. Перспективным направлением является интеграция самолетных данных со спутниковыми наблюдениями для валидации дистанционных методов зондирования атмосферы над Восточно-Сибирским регионом.

Библиография

Андреев Д. В. Лесные пожары в Якутии // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». 2021. № 10/20.

Антонович В. В., Антохина О. Ю., Антохин П. Н., Аршинова В. Г., Аршинов М. Ю. и др. Карбоновые полигоны ИОА СО РАН для исследования динамики парниковых газов в атмосфере. Часть 2 // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 4 (50). С. 61–69.

Антохина О. Ю., Антохин П. Н., Аршинова В. Г., Аршинов М. Ю. и др. Исследование динамики кон-

центрации парниковых газов на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 777–785.
Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К. и др. Особенности вертикального распределения углекислого газа над югом Западной Сибири в летний период // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 8. С. 670–681.
Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К. и др. Пространственная и временная изменчивость концентрации CO_2 и CH_4 в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 2. С. 183–192.
Ефимова А. П. Леса долины Средней Лены (Центральная Якутия): синтаксономический и динамический анализ. Новосибирск: Наука, 2011. 160 с.
Карсанаев С. В., Петров Р. Е., Максимов Т. Х. Эмиссия метана в растительных сообществах тундровых экосистем севера Якутии // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 1. С. 59–64.
Максимов Т. Х. Круговорот углерода в лиственничных лесах якутского сектора криолитозоны : Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 2007. 46 с.
Нестерова Н. В., Макарьева О. М., Федоров А. Н., Шихов А. Н. Геокриологические факторы активизации термокарстовых процессов в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2021. Т. 25, № 3. С. 739–749.
Оконешникова М. В., Лесовая С. Н., Десяткин Р. В. Почвы лиственничных лесов стационаров «Спасская падь» и «Элгээйи» (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 25, № 3. С. 71–79.
Панов А. В., Прокушкин А. С., Кюблер К. и др. Прецизионный мониторинг концентрации диоксида углерода и метана в приземной атмосфере полярного пояса Приенисейской Сибири // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 19–31.
Семилетов И. П., Шахова Н. Е. Баланс парниковых газов и изменение климата: роль деградации мерзлоты в Арктике // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2024. № 4. С. 5–43.
Чевычелов А. П., Горохов А. Н., Николаева О. А., Коробкова Т. С., Сабарайкина С. М. Почвенно-растительный покров Якутского ботанического сада. Новосибирск: СО РАН, 2022. 164 с.
Шепелев А. Г., Григорьев М. Р., Черепанова А. М., Максимов Т. Х., Федоров А. Н. Анализ запасов углерода в подстилке и почве Приленского плато // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. Т. 29, № 3. С. 397–407.
Andreeva D. O., Lebedeva L. S. River runoff duration changes in Central Yakutia under the climate warming // Hydrosphere. Hazard processes and phenomena. 2025. Vol. 7, № 1. P. 35–47.
Belikov D., Arshinov M., Belan B., Sasakawa M., Machida T., Davydov D., & Fofonov A. 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. № 10 (11). P. 1–18.
Blok D., Heijmans M. M. P. D., Schaepman-Strub G., Kononov A. V., Maximov T. C., Berendse F. Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra // Global Change Biology. 2010. Vol. 16, № 4. P. 1296–1305.
Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. № 10:264. P. 1–12.
Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (дата обращения: 12.03.2026).
Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Geneva, 2023. 184 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf (дата обращения: 16.03.2026).
Delwiche K. B., Knox S. H., Malhotra A., Fluet-Chouinard E., McNicol G., Feron S., ... Jackson, R. B. FLUXNET-CH4: a global, multi-ecosystem dataset and analysis of methane seasonality from freshwater wetlands // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13, № 7. P. 3607–3689.
Desyatkin R. V., Desyatkin A. R. Ecosystems of Alas Landscapes – The Basis for the Development of Cattle Breeding in the Harsh Natural and Climatic Conditions of the Permafrost Zone // Land. 2023. Vol. 12:288. P. 1–13.
Desyatkin R. V., Filippov N. V., Fedorov P. P., & Desyatkin A. R. Changes in the Temperature Regime of Soils under Larch and Pine Forests in Central Yakutia // Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58:148. P. 1–8.
Dolman A. J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Clais P., Tchebakova N., Chen T., van der Molen M. K., Belelli Marchesini L., Maximov T. C., Maksyutov S., Schulze E.-D. Anestimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosciences. 2012. № 9. P. 5323–5340.
Dowd E., Wilson C., Chipperfield M. P., Gloor E., Manning A., Doherty R. Decreasing seasonal cycle ampli-

tude of methane in the northern high latitudes being driven by lower-latitude changes in emissions and transport // Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. Vol. 23, № 13. P. 7363–7382.
East J. D., Jacob D. J., Balasus N., Bloom A. A., Bruhwiler L., Chen Z., Kaplan J. O., Mickley L. J., Mooring T. A., Penn E., Poulter B., Sulprizio M. P., Worden J. R., Yantosca R. M., Zhang Z. Interpreting the seasonality of atmospheric methane // Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51. P. 1–11.
Mu C. C., Abbott B. W., Norris A. J. et al. The status and stability of permafrost carbon on the Tibetan Plateau // Earth-Science Reviews. 2020. № 211 (10):103433.
Natali S. M., Schuur E. A. G., Mauritz M., Schade J. D., Celis G., Crummer K. G., Johnston C., Krapek J., Pegoraro E., Salmon V. G., & Webb E. E. Permafrost thaw and soil moisture driving CO2 and CH4 release from upland tundra // Geophysical Research: Biogeosciences. 2015. № 120 (3). P. 525–537.
NOAA Global Monitoring Laboratory. Methane (CH_4) Daily Mean Data. Global Average. URL: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/ (дата обращения: 12.03.2026).
Ohta T., Hiyama T., Tanaka H., Kuwada T., Maximov T. C., Ohata T., Fukushima Y. Seasonal variation in energy and water exchanges in an eastern Siberian larch forest (Larix cajanderi) // Hydrological Processes. 2001. Vol. 15, № 8. P. 1459–1476.
Salehnia N., Park C.-H., Park H., Fedorov N., Ahn J., Fedorov A., Son S.-W. Positive surface air temperature trends in a subarctic region: Analyzing the changes in dominant periodic components and energy budget // Atmospheric Research. 2025. Vol. 318. P. 107981.
Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia // Tellus B. 2010. Vol. 62. Issue 5. P. 403–416.
Sasakawa M., Tsuda N., Machida T., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Belan B. Revised methodology for CO2 and CH4 measurements at remote sites using a working standard-gas-saving system // Atmospheric Measurement Techniques. 2025. Vol. 18, № 8. P. 1717–1730.
Schuur E. A. G., Abbott B. W., Commane R., Ernakovich J., Euskirchen E., Hugelius G., Grosse G., Jones M., Koven C., Leshyk V., Lawrence D., Loranty M. M., Mauritz M., Olefeldt D., Natali S., Rodenhizer H., Salmon V., Schädel C., Strauss J., Treat C. and Turetsky M. Permafrost and Climate Change: Carbon Cycle Feedbacks From the Warming Arctic // Annual Review of Environment and Resources. 2022. № 47. P. 343–371.
Tei S., Sugimoto A., Yonenobu H., Hoshino Y. & Maximov T. C. Reconstruction of summer Palmer Drought Severity Index from δ13C of larch tree rings in East Siberia // Quaternary International. 2013. № 290–291. P. 275–281.
van Huissteden J., Berrittella C., Parmentier F. J. W., Mi Y., Maximov T.C., Dolman A. J. Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage // Nature Climate Change. 2011. Vol. 1, № 2. P. 119–123.
van Huissteden J., Maximov T. C., Kononov A. V., Dolman A. J. Summer soil CH_4 emission and uptake in taiga forest near Yakutsk, Eastern Siberia // Agricultural and Forest Meteorology. 2008. Vol. 148, № 12. P. 2006–2012.
Wang G., Peng Y., Chen L., Abbott B. W., Ciais P., Kang L., Liu Y., Li Q., Peñuelas J., Qin S., Smith P., Song Y., Strauss J., Wang J., Wei B., Yu J., Zhang D., Yang Y. Enhanced response of soil respiration to experimental warming upon thermokarst formation // Nature Geoscience. 2024. Vol. 17, № 6. P. 532–539.
Zhang Z. Q., Li M., Wen Z., Yin Z., Tang Y., Gao S., Wu Q. Degraded frozen soil and reduced frost heave in China due to climate warming // Science of the Total Environment. 2023. № 893. P. 1–11.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по проекту «Исследование биогеохимических циклов и адаптивных реакций растений бореальных и арктических экосистем северо-востока России», а также в рамках мониторинга и комплексных исследований климатически активных веществ в якутском секторе криолитозоны FWRS-2024-0083.

Alekseeva, A., Petrov, R., Grigoryev, M., Mordovskoy, P., Maximov, T. Seasonal and vertical variability of methane concentration over permafrost ecosystems of Central Yakutia. // Principy èkologii. 2026 № 3. P. 34–45. DOI: 10.15393/j1.art.2026.17142

SEASONAL AND VERTICAL VARIABILITY OF METHANE CONCENTRATION OVER PERMAFROST ECOSYSTEMS OF CENTRAL YAKUTIA

ALEKSEEVA Alexandra Vasilevna — *Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2, Petrovskogo St., Yakutsk, aav1312@mail.ru*

PETROV Roman Egorovich — *PhD, Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41, Lenin Ave., Yakutsk, pre2003@mail.ru*

GRIGORYEV Marat Robertovich — *Institute of Biological Problems of the Cryolithozone of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Lenin Ave., Yakutsk, eidosmarat@mail.ru*

MORDOVSKOY Petr Grigorevich — *PhD, Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2, Petrovskogo St., Yakutsk, mordovskoipg@yandex.ru*

MAXIMOV Trofim Hristoforovich — *D.Sc., Institute of Biological Problems of Cryolithozone of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Lenin Ave., Yakutsk, tcmax@mail.ru*

Key words:
atmosphere
methane
Siberia
Yakutia
permafrost
permafrost ecosystems
aircraft observations

Summary: The importance of methane monitoring in the atmosphere is due to its high climatic significance, especially in regions of cryolithic zone, which contain vast carbon reserves. The degradation of permafrost and the expansion of thermokarst lakes can lead to additional methane emissions, enhancing the greenhouse effect. This article examines seasonal variations, vertical distribution, and temporal changes in methane concentrations over Central Yakutia. A characteristic feature of the studied region allows us to consider annual dynamics within the framework of two main periods: a warm period with active vegetation and a cold period with suppressed biological processes. Ground-based and aircraft measurements of methane concentrations were carried out ranging from 34 m to 3,000 m from 2017 and 2021 above the Spasskaya Pad research station. It was found that during the study period, the average methane concentration during the cold season (October – March) was 1996 ppb, which is 22 ppb higher than in the warm season (April – September) - 1974 ppb. During the summer period, a pronounced maximum is observed in the surface layer at a height of 34–100 m, whereas in winter the distribution by altitude is more uniform. During the study period, an increase in the concentrations of methane in the atmosphere was observed. Local concentrations over Central Yakutia consistently exceed global background values by an average of 6%, which indicates a significant contribution from regional natural and anthropogenic sources. The data obtained from aircraft observations of methane concentrations at various altitudes are important for assessing the contribution of permafrost ecosystems to the global methane budget.

Received on: 26 March 2026 **Published on:** 29 September 2026

References

Andreev D. V. Forest fires in Yakutia, Nauchno-obrazovatel'nyy zhurnal dlya studentov i prepodavateley «StudNet». 2021. No. 10/20.

Andreeva D. O., Lebedeva L. S. River runoff duration changes in Central Yakutia under the climate warming, Hydrosphere. Hazard processes and phenomena. 2025. Vol. 7, No. 1. P. 35–47.

Antohina O. Yu. Antohin P. N. Arshinova V. G. Arshinov M. Yu. A study of the dynamics of greenhouse gas concentration in Western Siberia, Optika atmosfery i okeana. 2019. T. 32, No. 9. P. 777–785.

Antonovich V. V. Antohina O. Yu. Antohin P. N. Arshinova V. G. Arshinov M. Yu. Carbon test sites of the

Institute of Oceanology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for studying the dynamics of greenhouse gases in the atmosphere. Part 2, Sistemy kontrolya okruzhayuschey sredy. 2022. No. 4 (50). P. 61–69.

Arshinov M. Yu. Belan B. D. Davydov D. K. Features of the vertical distribution of carbon dioxide over the south of Western Siberia during the summer period, Optika atmosfery i okeana. 2018. T. 31, No. 8. P. 670–681.

Arshinov M. Yu. Belan B. D. Davydov D. K. Spatial and temporal variability of CO_2 and CH_4 concentrations in the surface layer of air in Western Siberia, Optika atmosfery i okeana. 2009. T. 22, No. 2. P. 183–192.

Belikov D., Arshinov M., Belan B., Sasakawa M., Machida T., Davydov D., & Fofonov A. 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. No. 10 (11). P. 1–18.

Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G. et al. Permafrost is warming at a global scale, Nature Communications. 2019. No. 10:264. P. 1–12.

Blok D., Heijmans M. M. P. D., Schaepman-Strub G., Kononov A. V., Maximov T. C., Berendse F. Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra, Global Change Biology. 2010. Vol. 16, No. 4. P. 1296–1305.

Chevychelov A. P. Gorohov A. N. Nikolaeva O. A. Korobkova T. S. Sabaraykina S. M. The soil and vegetation cover of the Yakutsk Botanical Garden.Novosibirsk: SO RAN, 2022. 164 p.

Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (data obrascheniya: 12.03.2026).

Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Geneva, 2023. 184 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf (data obrascheniya: 16.03.2026).

Delwiche K. B., Knox S. H., Malhotra A., Fluet-Chouinard E., McNicol G., Feron S., ... Jackson, R. B. FLUXNET-CH4: a global, multi-ecosystem dataset and analysis of methane seasonality from freshwater wetlands, Earth System Science Data. 2021. Vol. 13, No. 7. P. 3607–3689.

Desyatkin R. V., Desyatkin A. R. Ecosystems of Alas Landscapes – The Basis for the Development of Cattle Breeding in the Harsh Natural and Climatic Conditions of the Permafrost Zone, Land. 2023. Vol. 12:288. P. 1–13.

Desyatkin R. V., Filippov N. V., Fedorov P. P., & Desyatkin A. R. Changes in the Temperature Regime of Soils under Larch and Pine Forests in Central Yakutia, Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58:148. P. 1–8.

Dolman A. J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Clais P., Tchebakova N., Chen T., van der Molen M. K., Belelli Marchesini L., Maximov T. C., Maksyutov S., Schulze E, D. Anestimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods, Biogeosciences. 2012. No. 9. P. 5323–5340.

Dowd E., Wilson C., Chipperfield M. P., Gloor E., Manning A., Doherty R. Decreasing seasonal cycle amplitude of methane in the northern high latitudes being driven by lower-latitude changes in emissions and transport, Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. Vol. 23, No. 13. P. 7363–7382.

East J. D., Jacob D. J., Balasus N., Bloom A. A., Bruhwiler L., Chen Z., Kaplan J. O., Mickley L. J., Mooring T. A., Penn E., Poulter B., Sulprizio M. P., Worden J. R., Yantosca R. M., Zhang Z. Interpreting the seasonality of atmospheric methane, Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51. P. 1–11.

Efimova A. P. Forests of the Middle Lena Valley (Central Yakutia): syntaxonomic and dynamic analysisNovosibirsk: Nauka, 2011. 160 p.

Karsanaev S. V. Petrov R. E. Maksimov T. H. Methane emission in plant communities of tundra ecosystems in the north of Yakutia, Ekologiya urbanizirovannyh territoriy. 2022. No. 1. P. 59–64.

Maksimov T. H. The carbon cycle in larch forests of the Yakut sector of the cryolithozone: Avtoref. dip. ... d-ra biol. nauk. Krasnoyarsk, 2007. 46 p.

Mu C. C., Abbott B. W., Norris A. J. et al. The status and stability of permafrost carbon on the Tibetan Plateau, Earth-Science Reviews. 2020. No. 211 (10):103433.

NOAA Global Monitoring Laboratory. Methane (CH_4) Daily Mean Data. Global Average. URL: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/ (data obrascheniya: 12.03.2026).

Natali S. M., Schuur E. A. G., Mauritz M., Schade J. D., Celis G., Crummer K. G., Johnston C., Krapek J., Pegoraro E., Salmon V. G., & Webb E. E. Permafrost thaw and soil moisture driving CO2 and CH4 release from upland tundra, Geophysical Research: Biogeosciences. 2015. No. 120 (3). P. 525–537.

Nesterova N. V. Makar'eva O. M. Fedorov A. N. Shihov A. N. Geocryological factors influencing the intensification of thermokarst processes in Central Yakutia, Kriosfera Zemli. 2021. T. 25, No. 3. P. 739–749.

Ohta T., Hiyama T., Tanaka H., Kuwada T., Maximov T. C., Ohata T., Fukushima Y. Seasonal variation in energy

and water exchanges in an eastern Siberian larch forest (Larix cajanderi), Hydrological Processes. 2001. Vol. 15, No. 8. P. 1459–1476.

Okoneshnikova M. V. Lesovaya S. N. Desyatkin R. V. Soils of larch forests at the “Spasskaya Pad” and “Elgeeyi” research stations (Central Yakutia), Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. 2018. T. 25, No. 3. P. 71–79.

Panov A. V. Prokushkin A. S. Kyubler K. Precise monitoring of carbon dioxide and methane concentrations in the surface atmosphere of the polar zone in the Yenisei region of Siberia., Meteorologiya i gidrologiya. 2022. No. 11. P. 19–31.

Salehnia N., Park C, H., Park H., Fedorov N., Ahn J., Fedorov A., Son S, W. Positive surface air temperature trends in a subarctic region: Analyzing the changes in dominant periodic components and energy budget, Atmospheric Research. 2025. Vol. 318. P. 107981.

Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia, Tellus B. 2010. Vol. 62. Issue 5. P. 403–416.

Sasakawa M., Tsuda N., Machida T., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Belan B. Revised methodology for CO2 and CH4 measurements at remote sites using a working standard-gas-saving system, Atmospheric Measurement Techniques. 2025. Vol. 18, No. 8. P. 1717–1730.

Schuur E. A. G., Abbott B. W., Commane R., Ernakovich J., Euskirchen E., Hugelius G., Grosse G., Jones M., Koven C., Leshyk V., Lawrence D., Loranty M. M., Mauritz M., Olefeldt D., Natali S., Rodenhizer H., Salmon V., Schädel C., Strauss J., Treat C. and Turetsky M. Permafrost and Climate Change: Carbon Cycle Feedbacks From the Warming Arctic, Annual Review of Environment and Resources. 2022. No. 47. P. 343–371.

Semiletov I. P. Shahova N. E. Greenhouse gas balance and climate change: the role of permafrost degradation in the Arctic, Vestnik Dal’nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk. 2024. No. 4. P. 5–43.

Shepelev A. G. Grigor’ev M. R. Cherepanova A. M. Maksimov T. H. Fedorov A. N. Analysis of carbon stocks in the litter and soil of the Prilensky Plateau, Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. 2024. T. 29, No. 3. P. 397–407.

Tei S., Sugimoto A., Yonenobu H., Hoshino Y. & Maximov T. C. Reconstruction of summer Palmer Drought Severity Index from δ13C of larch tree rings in East Siberia, Quaternary International. 2013. No. 290–291. P. 275–281.

Wang G., Peng Y., Chen L., Abbott B. W., Ciais P., Kang L., Liu Y., Li Q., Peñuelas J., Qin S., Smith P., Song Y., Strauss J., Wang J., Wei B., Yu J., Zhang D., Yang Y. Enhanced response of soil respiration to experimental warming upon thermokarst formation, Nature Geoscience. 2024. Vol. 17, No. 6. P. 532–539.

Zhang Z. Q., Li M., Wen Z., Yin Z., Tang Y., Gao S., Wu Q. Degraded frozen soil and reduced frost heave in China due to climate warming, Science of the Total Environment. 2023. No. 893. P. 1–11.

van Huissteden J., Berrittella C., Parmentier F. J. W., Mi Y., Maximov T.C., Dolman A. J. Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage, Nature Climate Change. 2011. Vol. 1, No. 2. P. 119–123.

van Huissteden J., Maximov T. C., Kononov A. V., Dolman A. J. Summer soil CH_4 emission and uptake in taiga forest near Yakutsk, Eastern Siberia, Agricultural and Forest Meteorology. 2008. Vol. 148, No. 12. P. 2006–2012.