

Динамика концентрации CO₂ по данным самолетных наблюдений над Центральной Якутией за 2018-2020 гг.

А.В. Алексеева^{1)}, М.Р. Григорьев²⁾, Е.В. Старостин¹⁾, Р.Е. Петров²⁾,
П.Г. Мордовской¹⁾, Т.Х. Максимов²⁾*

¹⁾ФИЦ Якутский научный центр СО РАН,
Россия, 677980, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Петровского, 2

²⁾ИБПК СО РАН,
Россия, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 41

Адрес для переписки: *aav1312@mail.ru

Реферат. Мониторинг концентрации углекислого газа в приземном слое атмосферы является актуальной задачей в условиях глобальных климатических изменений по причине взаимосвязи роста температуры и концентрации CO₂. В данной статье представлены результаты анализа сезонных колебаний, вертикального распределения и динамики одержания углекислого газа над Центральной Якутией.

Исследуемый регион, с его обширной многолетней мерзлотой и типичным бореальным таежным лесом, является важным звеном для понимания динамики изменений углеродного цикла Северо-Востока России. Деградация мерзлотных экосистем в условиях потепления может привести к эмиссии накопленного углерода.

Отбор образцов воздуха проводился на разных высотах от 100 м до 3000 м с частотой один раз в месяц в дневное время над лесной научной станцией «Спасская Падь». Результаты трехлетнего анализа отражают сезонные колебания концентрации CO₂, его распределение на исследуемых высотах в планетарном пограничном слое атмосферы над территорией Центральной Якутией. В работе выявлено, что в холодный продолжительный период наблюдается накопление содержания углекислого газа в атмосфере и значительное снижение значений в теплый сезон, максимальные средние значения концентрации регистрируются в феврале-марте, а минимальные в июне-июле. При этом в зимние месяцы отмечается относительно равномерное распределение концентрации CO₂ на разных высотах, в отличие от летних месяцев, когда регистрируются значительные отклонения в показателях концентраций. Динамика концентрации углекислого газа демонстрирует постепенный рост содержания CO₂ в атмосфере, наблюдается ежегодный рост средних значений концентрации как в холодный, так и в теплый период времени года.

Полученная количественная характеристика сезонной динамики концентрации CO_2 и выявленная направленность изменений могут дополнить понимание ее пространственно-временной изменчивости в различных климатических регионах России. Исследование также позволяет выявить особенности содержания углекислого газа в мерзлотных экосистемах, что имеет важное значение для адекватной оценки влияния изменений климата.

Ключевые слова. Атмосфера, концентрация CO_2 , углекислый газ, Сибирь, Якутия, многолетняя мерзлота, мерзлотные экосистемы, самолетные наблюдения.

Dynamics of CO_2 concentration: Aircraft measurements over Central Yakutia during (2018-2020)

A.V. Alekseeva^{1)}, M.R. Grigoryev²⁾, E.V. Starostin¹⁾, R.E. Petrov²⁾,
P.G. Mordovskoy¹⁾, T.Ch. Maximov²⁾*

¹⁾Federal Research Center “Yakut Scientific Center SB RAS”,
2, Petrovskogo str., 677980, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

²⁾IBPC SB RAS,
41, Lenin ave., 677000, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

Correspondence address: **aav1312@mail.ru*

Abstract. Monitoring carbon dioxide concentrations in the near-surface atmospheric layer is a current task in the context of global climate change, due to the interrelationship between rising temperatures and CO_2 levels. This article presents the results of an analysis of seasonal fluctuations in carbon dioxide content, its vertical distribution, and temporal dynamics over Central Yakutia.

The studied region, with its extensive permafrost and typical boreal taiga forest, is an important link for understanding the dynamics of changes in the carbon cycle of northeastern Russia. The degradation of permafrost ecosystems under warming conditions may lead to the emission of accumulated carbon dioxide.

The study region, with its extensive permafrost and typical boreal taiga forest, is an important area for understanding the dynamics of the carbon cycle in northeastern Russia. The degradation of permafrost soils under warming conditions can lead to the emission of accumulated carbon.

Air samples were collected at various altitudes, from 100 m to 3000 m, once a month during daylight hours above the scientific forest station Spasskaya Pad. The results of a three-year analysis reflect seasonal fluctuations in CO_2 concentration and its distribution at the different heights within the planetary boundary layer over Central Yakutia. The study found that during the long cold period, there is an accumulation of carbon dioxide in the atmosphere, with a significant decrease in values during the warm season. Maximum average concentrations are recorded in February-March, while minimum values are observed in June-July. In winter months, the CO_2 concentration is distributed relatively evenly across different

altitudes. In contrast to summer months, when significant deviations in concentration levels are observed. The dynamics of carbon dioxide concentration demonstrate a gradual increase in atmospheric CO₂, with an annual rise in average values observed in both the cold and warm periods of the year.

The obtained quantitative characteristics of the seasonal dynamics of CO₂ concentration and the rate of its increase can contribute to a better understanding of changes in carbon dioxide concentration across various climatic regions of Russia. The study also reveals specific features of carbon dioxide content in permafrost ecosystems, which is crucial for an adequate assessment of the impact of climate change.

Keywords. Atmosphere, CO₂ concentration, carbon dioxide, Siberia, Yakutia, permafrost ecosystems, aircraft monitoring.

Введение

Атмосферный углекислый газ (CO₂) вносит основной вклад в парниковый эффект, который приводит к глобальному изменению климата. Глобальное потепление влечет за собой негативные последствия для жизни человека и экологических систем различного масштаба. Связь между ростом концентрации диоксида углерода в атмосфере и ростом глобальной приземной температуры подробно представлена в Шестом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата, где подтверждается вывод о том, что существует зависимость между выбросами CO₂ и вызываемым ими глобальным потеплением. Согласно оценкам экспертов, каждая 1000 Гт CO₂ кумулятивных выбросов диоксида углерода вызывает повышение глобальной приземной температуры на 0.27-0.63°C (IPCC, 2021).

С началом промышленной деятельности человека и развитием экономики отмечается быстрый рост содержания диоксида углерода в атмосфере. Рост приземной температуры влечет за собой изменения биологических сообществ, повышение уровня моря и природные катастрофы, влияя на устойчивость природных и антропогенных систем. Источники эмиссий парниковых газов, вызванных деятельностью человека, связаны с добычей, перевозкой и использованием ископаемого топлива, промышленным производством, сельским хозяйством, а также трансформацией земельных ресурсов.

Сокращение эмиссий парниковых газов, в первую очередь углекислого газа, стало глобальным приоритетом, страны заключили международные соглашения о достижении углеродной нейтральности и внедряют низкоуглеродные технологии в промышленности, тем не менее среднемировая концентрация CO₂ в атмосфере продолжает увеличиваться. По данным Всемирной метеорологической организации по парниковым газам значение в 2023 году достигло 420 ppm, что на 42.9 ppm больше, чем 20 лет назад, и на 51% больше, чем концентрация диоксида углерода в доиндустриальный период (The WMO Global Atmosphere Watch Greenhouse Gas Bulletin, 2024).

Средняя температура в России за последние десятилетия растет значительно быстрее, чем в среднем по планете, потепление в России составило

около $+2.5^{\circ}\text{C}$, а в Арктических регионах еще выше – аномалия достигла $4...+6^{\circ}\text{C}$, ускоряя таяние льдов и многолетней мерзлоты (Росгидромет, 2022).

Якутия, как территория сплошной многолетней мерзлоты с особыми климатическими условиями представляет собой масштабный регион для проведения исследовательских работ, направленных на мониторинг и анализ динамики концентрации углекислого газа в атмосфере. Изменения климата существенно повлияли на среднегодовые температуры воздуха, количество осадков, длительность сезонов года и глубину сезонного протаивания почв (Десяткин, 2018). Повышение среднегодовой температуры воздуха способно вызвать активизацию биохимических процессов в почвах криолитозоны (Максимов, 2007).

Район исследования характеризуется преобладанием бореальных среднетаежных, преимущественно лиственных брусничных лесов. В Центральной Якутии средняя годовая температура воздуха составляет -10.3°C при средней многолетней температуре самого холодного месяца $-43...-45^{\circ}\text{C}$ и самого теплого месяца $18-19^{\circ}\text{C}$. Продолжительность теплого периода (выше 0°C) составляет 140 дней. Осадков выпадает 200-220 мм, из них на теплый период (май-сентябрь) приходится 70-75% годовой суммы. Рассматриваемая территория находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, у которых фоновые значения средних годовых температур равны $-1.5...-3^{\circ}\text{C}$ (Петров, Федоров, 2023).

На научной лесной станции «Спасская Падь» (Центральная Якутия) в течение более 25 лет осуществляется наземный мониторинг за тенденциями изменений концентрации парниковых газов, а также проводятся исследования особенностей углеродного газообмена экосистем криолитозоны (Максимов, 2023), процесса фотосинтеза (Григорьев и др., 2023), концентрации черного углерода в атмосфере (Мордовской и др., 2024), изучения характеристик репрезентативных экосистем (Петров, Федоров, 2023), содержания углерода в почвах (Шепелев и др., 2024), углеродного и водного циклов лесных экосистем мерзлотных экосистем (Кононов и др., 2018) и другие междисциплинарные научные исследования по решению фундаментальных вопросов.

Самолетные исследования над станцией «Спасская Падь» были введены в рамках проекта JR-Station (Belikov et al., 2019) с целью понимания вертикального распределения CO_2 в атмосфере. Наблюдательная сеть мониторинга парниковых газов была установлена на девяти объектах, восемь пунктов расположены в Западной Сибири и один – в Центральной Якутии на станции «Спасская Падь» (Sasakawa et al., 2024). Реализация проекта обусловлена значимостью проблемы изменения климата и необходимостью определения вклада региона в глобальный углеродный баланс. В последующих работах может быть расширен анализ более продолжительного ряда данных самолетных исследований для определения взаимосвязи с наземными наблюдениями и влияния локальных факторов на эмиссию CO_2 .

Методы исследования

Самолетные исследования для сбора образцов воздуха на легком многоцелевом самолете проводились над лесной научной станцией «Спасская Падь», Центральная Якутия (рис. 1). Пробы воздуха отбирались на высотах 100 м, 500 м, 1000 м, 2000 м, 3000 м один раз в месяц с 13:00 до 15:00 по местному времени. Дневное время, когда интенсивность фотосинтеза находится в максимуме, а нижние слои тропосферы хорошо перемешаны соответствует методике исследований вертикального распределения CO_2 над югом Западной Сибири (Аршинов и др., 2018). Высоты для исследования выбраны исходя из предположения, что концентрация диоксида углерода на высоте до 500 м отражает действие локальных источников и стоков CO_2 , в то время как на уровне 2000-3000 м преобладают фоновые концентрации, обусловленные глобальными атмосферными процессами. Использование расчета усредненных данных измерений, проведенных в дневное время, позволяет исключить завышение средних значений концентрации CO_2 , связанное с его накоплением в устойчивом пограничном слое при инверсии температуры (Тимохина и др., 2018).



Рисунок 1. Лесная научная станция «Спасская падь» с высоты полета

Picture 1. Spasskaya Pad forest research station, the view from the aircraft

Для отбора проб атмосферного воздуха использовался самодельный мобильный прибор для сбора образцов воздуха (рис. 2). Прибор состоит из следующих компонентов: поршневой насос КР-М330 (ElectroCraft, США) с компрессором MB-158 (IBS Company LTD., Япония); клапан противодавления, поддерживающий постоянный расход воздуха на уровне на уровне 0.8 л/мин; аналоговый манометр (Takashima Keiki, Япония) со шкалой 0-0.6 МПа для визуального контроля давления. Электропитание прибора обеспечивается через преобразователь напряжения (PowerTite, Япония) и трансформатор (Toyouzumi Dengenkik, Япония).

Пробы воздуха отбирались на указанных высотах в лабораторные стеклянные колбы с двойным клапаном (рис. 2), объемом 2 л, которые предварительно продувались через поршневой насос около одной минуты, а затем заполнялись воздухом через кабель, пропущенный к крылу самолета.

Образцы воздуха после отбора отправлялись авиатранспортом из Якутии в Японию в пластиковом противоударном контейнере. Анализ проводился в Национальном институте экологических исследований (National Institute for Environmental Studies, NIES) на газовом хроматографе GC-8A, Shimadzu (Япония) по методологии (Machida et al., 2008), разработанной для авиационных измерений. Калибровка хроматографа проводилась по двум стандартным газовым смесям, сертифицированными NIES. Диапазоны измерений и погрешности определения концентрации CO_2 составили 380-426 ppm ± 0.1 ppm (погрешность газохроматографического анализа).

Основным источником погрешности является неопределенность, связанная с транспортировкой проб из удаленного региона. Учитывая этот фактор, общая погрешность измерений оценивается как существенно превышающая инструментальную ± 0.1 ppm, что следует рассматривать как ограничение.

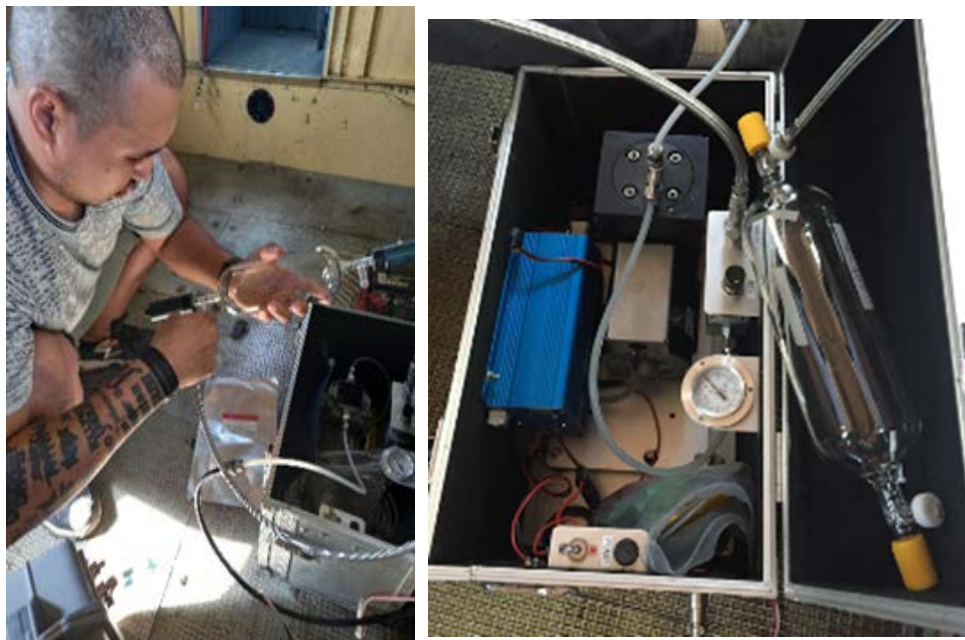


Рисунок 2. Поршневой насос и стеклянные колбы

Picture 2. Air pump and glass bottles for air samples

Результаты

Результаты измерений содержания диоксида углерода в пограничном слое атмосферы на разных высотах за 2018-2020 гг. над научной лесной станцией «Спаская Падь» приведены на рис. 3. На графике средних значений концентрации CO_2 в эти годы отчетливо наблюдается сезонный цикл: повышение в холодный период и снижение в теплый. В большинстве случаев средние значе-

ния концентрации CO_2 несколько выше на меньших высотах (100 м, 500 м), чем на больших (2000 м, 3000 м), кроме летних месяцев июнь и июль (рис. 4). Однако, эта разница не всегда значительна, иногда наблюдаются отклонения.

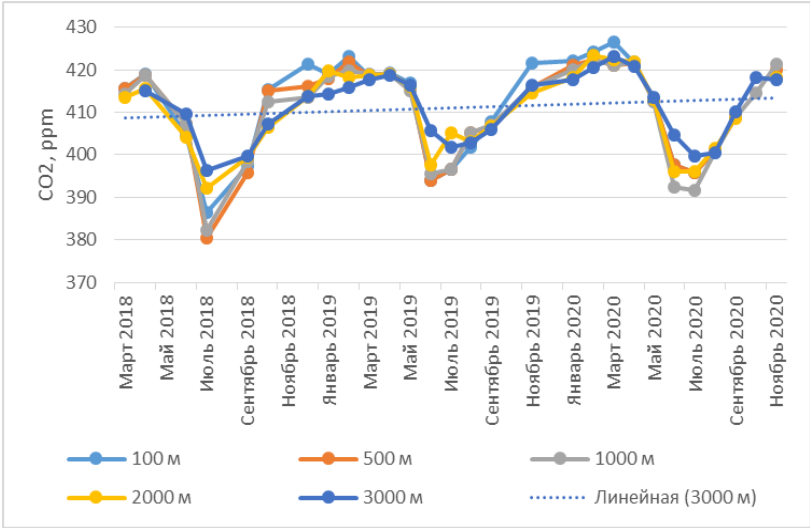


Рисунок 3. Изменение концентрации диоксида углерода на разных высотах над Центральной Якутией

Figure 3. Changes in carbon dioxide concentration at different altitudes over Central Yakutia

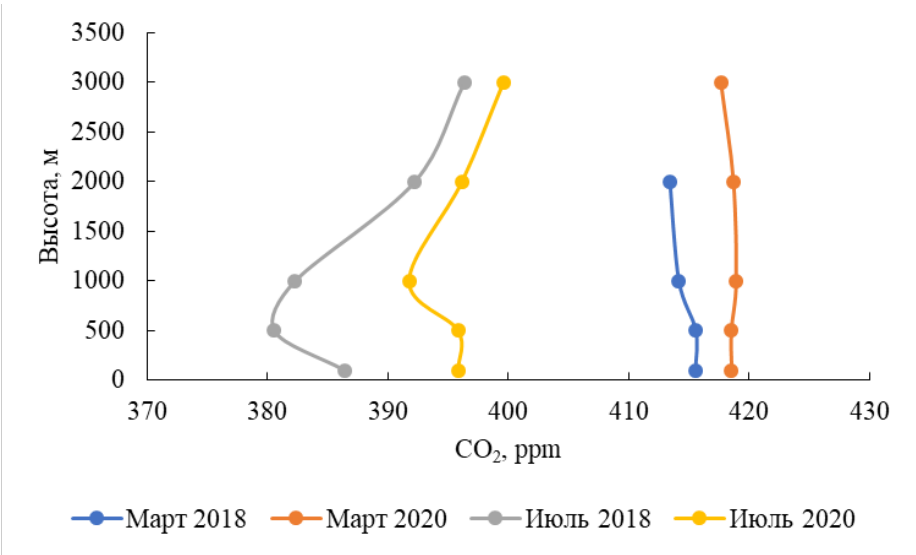


Рисунок 4. Изменчивость концентрации CO_2 на разных высотах в холодный и теплый периоды

Figure 4. Variability of CO_2 concentration at different altitudes during cold and warm periods

На рис. 5 представлены минимумы и максимумы средних значений концентрации вертикального распределения диоксида углерода, по данным самолетных измерений, на разных высотах в период за 2018-2020 гг. В указанный

период наибольшая изменчивость средних значений концентрации диоксида углерода наблюдается на высоте 500 м, размах составляет 41.9 ppm, наименьшая разница отмечается на высоте 3000 м и составляет 26.7 ppm. В масштабах всех исследуемых высот наибольшая изменчивость концентрации диоксида углерода на высотах 100 м и 500 м указывает на сильное влияние локальных источников (почва, растительность). На высоте 2000-3000 м отмечаются более стабильные значения. Наименьшее значение зафиксировано на высоте 500 м в июле 2018 года и составило 380.6 ppm, также июль указанного года отмечает минимумы на всех высотах за исследуемый трехлетний период. Наибольшее значение 426.4 ppm зарегистрировано на высоте 100 м в марте 2020 г.

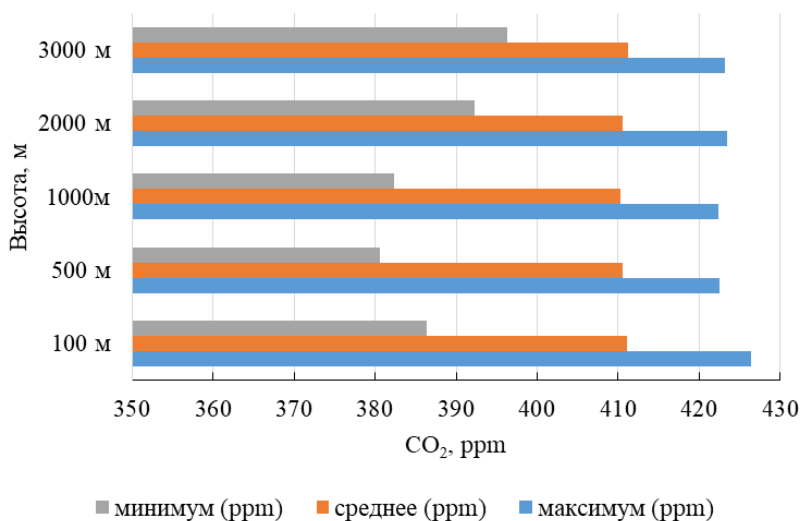


Рисунок 5. Минимумы и максимумы концентраций CO₂ на каждой высоте за 2018-2020 гг.

Figure 5. Minimum and maximum CO₂ concentrations (ppm) at each altitude (2018-2020)

Обсуждение результатов

Исследование выявило, что в Центральной Якутии концентрация диоксида углерода в приземном слое атмосферы за исследуемый период возрастает. Анализ полученных данных за трехлетний период позволил получить предварительную оценку величины изменения средних значений концентрации CO₂ всех высот, которая составила 2.6 ppm в год. Эта тенденция согласуется с данными, полученными над территорией Западной Сибири. Самолетные исследования Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (г. Томск) выявили положительный тренд роста концентрации CO₂, за период 2009-2018 гг. на обсерватории «Фоновая» (56°25' с.ш., 84°04' в.д.) зафиксирован рост концентрации со значением 2.28 ppm в год (Антохина и др., 2019). Данные, полученные на обсерватории Мауна-Лоа (19°32' с.ш., 155°35' в.д.) и опубликованные в открытых источниках (GML NOAA) также демонстрируют устойчивый рост содержания углекислого газа в атмосфере и за период 2018-2020 гг. рост CO₂ составил 2.75 ppm в год. Эти результаты

подтверждают глобальную тенденцию устойчивого роста концентрации углекислого газа.

Измерения, полученные на обсерватории Мауна-Лоа, используются для сопоставительного анализа, поскольку приняты в научном сообществе достоверными и ориентировочными (Тимохина и др., 2015). Ниже в табл. 1 отражены максимальные значения концентрации диоксида углерода в зимний и летний периоды по данным самолетных измерений над станцией «Спасская падь» в сравнении с данными обсерватории Мауна-Лоа (данные: Esrf.noaa.gov). Для сравнения выбрана высота 3000 м над лесной научной станцией «Спасская падь» в связи с тем, что обсерватория Мауна-Лоа расположена на высоте 3394 м над уровнем моря, а также высота метеорологической вышки 34 м. Такой подход позволяет минимизировать влияние различий в высотном положении станций на результаты анализа концентрации CO₂.

Таблица 1. Максимальные концентрации средних значений CO₂
в исследуемый период 2018-2020

Table 1. Maximum values of mean CO₂ concentrations observed during the study period
from 2018 to 2020

	CO ₂ (ppm)		CO ₂ (ppm) Обсерватория Мауна Лоа
	Станция «Спасская падь» На высоте 34 м	На высоте 3000 м	
Июнь 2018	394.9	409.72	410.99
Июнь 2019	397.84	405.8	414.15
Июнь 2020	394.89	404.62	416.58
Декабрь 2018	419.45	413.7	409.27
Ноябрь 2019	423.34	416.35	410.47
Ноябрь 2020	421.6	417.78	413.1

Концентрации диоксида углерода по данным станции «Спасская падь» и обсерватории Мауна-Лоа демонстрируют заметные различия в максимальных концентрациях. В летний период в Якутии максимальные концентрации ниже, чем значения концентрации углекислого газа в этот же календарный месяц над Мауна Лоа. В зимний период над Центральной Якутией, напротив, фиксируются более высокие значения, что может быть связано с эмиссией промышленных центров, инверсией температур и низкой ветреной активностью в рассматриваемый период.

В Якутии в холодный продолжительный период, наблюдается накопление диоксида углерода на всех высотах с октября по март, пиковые средние значения достигаются в феврале-марте. Летом наблюдается резкий спад средних значений концентрации диоксида углерода на каждой высоте, минимальные значения зафиксированы на высоте 34 м (табл. 1), что связано с вегетационным периодом лесов и продолжительностью светового дня (Максимов, 2007). В летний период отмечается высокая изменчивость атмосферного содержания CO₂ на различных высотах, также, как и в пунктах сети

мониторинга на территории Западной Сибири (Антонович и др., 2022). Соответственно в холодный сезон, когда отсутствует естественный сток CO_2 , и преобладает антициклональный режим погоды, отмечается сглаженный ход концентрации CO_2 и более плавный длительный период. Начало периода снижения концентрации диоксида углерода фиксируется в апреле-мае и продолжается до июля, когда достигается минимум. В августе уже отмечается обратный рост концентрации.

Вертикальное распределение концентрации диоксида над исследуемым регионом демонстрирует большую изменчивость на нижних высотах особенно в летний сезон, что может указывать на влияние локальных факторов. На высоте 2000-3000 м наблюдаются более стабильные значения концентрации диоксида углерода.

Заключение

В статье представлены данные, накопленные за 2018-2020 годы самолетных наблюдений вертикального распределения диоксида углерода в Центральной Якутии. На их основе определены вертикальные профили распределения CO_2 и выявлена направленность вариаций его концентрации над исследуемым регионом. Проведенные исследования выявили тенденцию к росту концентрации углекислого газа в исследуемом регионе, расчетная величина составила 2.6 ppm в год. За трехлетний период максимальное среднее значение содержания CO_2 достигло 426 ppm в марте 2020 года на высоте 100 м, а минимальное – 380 ppm на высоте 500 м в июле 2018 года. Сезонные колебания демонстрируют выраженную динамику: максимальные средние значения наблюдаются в зимний период, минимальные фиксируются в летний сезон. Полученные результаты показывают, что локальные факторы имеют влияние на высотах до 500 м, а на высотах 2000-3000 м концентрации более стабильны. Проведенные самолетные исследования позволили количественно проследить динамику содержания углекислого газа в атмосфере и расширить понимание региональных особенностей криолитозоны Якутии. Значимость данных исследований состоит в формировании комплексной картины о роли обширных репрезентативных лесных экосистем криолитозоны в условиях глобального потепления и изучении влияния климатических изменений на их целостность.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, тема № 124102500817-7.

Список литературы

Антонович, В.В., Антохина, О.Ю., Антохин, П.Н., Аршинова, В.Г., Аршинов, М.Ю., Белан, Б.Д., Белан, С.Б., Давыдов, Д.К., Дудорова, Н.В., Ивлев, Г.А., Козлов, А.В., Максютков, Ш.Ш., Мачида, Т., Пестунов, Д.А., Пташник, И.В., Рассказчикова, Т.М., Савкин, Д.Е., Сасакава, М., Симоненков, Д.В.,

Складнева, Т.К., Толмачев, Г.Н., Фофонов, А. В. (2022) Карбоновые полигоны ИОА СО РАН для исследования динамики парниковых газов в атмосфере. Часть 2, *Системы контроля окружающей среды*, № 4 (50), с. 61-69, URL: <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-4-61-69>.

Антохина, О.Ю., Антохин, П.Н., Аршинова, В.Г., Аршинов, М.Ю., Белан, Б.Д., Белан, С.Б., Давыдов, Д.К., Дудорова, Н.В., Ивлев, Г.А., Козлов, А.В., Краснов, О.А., Максюттов, Ш.Ш., Мачида, Т., Панченко, М.В., Пестунов, Д.А., Рассказчикова, Т.М., Савкин, Д.Е., Сасакава, М., Симоненков, Д.В., Складнева, Т.К., Толмачев, Г.Н., Фофонов, А.В. (2019) Исследование динамики концентрации парниковых газов на территории Западной Сибири, *Оптика атмосферы и океана*, № 9, с. 777-785.

Аршинов, М.Ю., Белан, Б.Д., Давыдов, Д.К., Краснов, О.А., Maksutov, Sh., Machida, T., Sasakawa, M., Фофонов, А.В. (2018) Особенности вертикального распределения углекислого газа над югом Западной Сибири в летний период, *Оптика атмосферы и океана*, № 8, с. 670-681.

Григорьев, М.Р., Максимов, Т.Х., Максимов, А.П. (2023) Эколого-физиологические особенности процесса фотосинтеза берёзы плосколистной (*Betula platyphylla*) в Якутии, *X Съезд общества физиологов растений России "Биология растений в эпоху глобальных изменений климата"*, Всероссийская научная конференция с международным участием, тезисы докладов, Уфа, с. 120.

Десяткин, Р.В. (2018) Изменение климата и динамика мерзлотных экосистем центра материковой криолитозоны Северного полушария, *Вестник Российской Академии наук*, № 88(12), с. 1113-1121, URL: <https://doi.org/10.31857/S086958730003190-7>.

Кононов, А.В., Максимов, А.П., Петров, Р.Е., Терентьева, М.П. (2018) Особенности углеродного и водного циклов лесных экосистем криолитозоны в контексте глобального изменения климата, *Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды, Сборник материалов Годичного собрания Общества физиологов растений России Всероссийской научной конференции с международным участием и школы молодых ученых*, с. 492-495, URL: <https://doi.org/10.31255/978-5-94797-319-8-492-495>.

Максимов, Т.Х. (2007) *Круговорот углерода в лиственных лесах якутского сектора криолитозоны*, автореферат на соискание ученой степени доктора биологических наук, Институт леса им. В. Н. Сукачева, Красноярск, 324 с.

Максимов, Т.Х. (2023) Особенности углеродного газообмена экосистем криолитозоны в контексте глобального изменения климата, *X Съезд общества физиологов растений России "Биология растений в эпоху глобальных изменений климата"*, Уфа, с. 231-231, URL: <https://doi.org/10.31163/978-5-6047532-1-7>.

Мордовской, П.Г., Максимов, Т.Х., Григорьев, М.Р., Старостин, Е.В., Неустроев, А.А. (2024) Влияние повышенных концентраций черного углерода в атмосфере на фотосинтез в листьях березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.) в Центральной Якутии, *Биосфера*, т. 16. № 1, с. 30-35.

Петров, М.И., Федоров, А.Н. (2023) Влияние климатических условий на лесные пожары в Центральной Якутии, *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, № 28 (2), с. 248-260, <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-248-260>.

Росгидромет (2022) *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*, URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf (дата обращения: 14.01.2025).

Тимохина, А.В., Прокушкин, А.С., Панов, А.В., Колосов, Р.А., Сиденко, Н.В., Лаврич, Й., Хайманн, М. (2018) Межгодовая изменчивость концентрации диоксида углерода в атмосфере над центральной частью Сибири (по данным международной обсерватории ZOTTO за 2009-2015 гг.), *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 20-28.

Тимохина, А.В., Прокушкин, А.С., Онучин, А.А., Панов, А.В., Кофман, Г.Б., Верховец, С.В., Хайманн, М. (2015) Многолетний тренд концентрации CO₂ в приземной атмосфере над Центральной Сибирью, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 58-64.

Шепелев, А.Г., Григорьев, М.Р., Черепанова, А.М., Максимов, Т.Х. Федоров, А.Н. (2024) Анализ запасов углерода в подстилке и почве Приленского плато, *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, т. 29, № 3, с. 397-407, URL: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-397-407>.

Belikov, D., Arshinov, M., Belan, B., Sasakawa, M., Machida, T., Davydov, D., Fofonov, A. (2019) Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO₂ and CH₄ at tower network in Siberia from 2005 to 2016, *Atmosphere*, no. 10(11), pp. 1-18, URL: <https://doi.org/10.3390/atmos10110689>.

IPCC (2021) *Climate change 2021: The physical science basis [Report]*, URL: https://ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM-Russian.pdf (accessed 14.01.2025).

Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirokuni, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, T., Ishikawa, K., Ogawa, T. (2008) Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines, *Atmospheric and Oceanic Technology*, no. 25(10), pp. 1744-1754, URL: <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1082.1>.

Sasakawa, M., Tsuda, N., Machida, T., Arshinov, M., Davydov, D. (2024) Working standard gas saving system for in-situ CO₂ and CH₄ measurements and calculation method for concentrations and their uncertainty, *Atmospheric Measurement Techniques*, no. 17, pp. 1-18, URL: <https://doi.org/10.5194/amt-2023-246>.

References

Antonovich, V.V., Antohina, O.Yu., Antohin, P.N., Arshinova, V.G., Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Belan, S.B., Davydov, D.K., Ivlev, G.A., Kozlov, A.V., Maksyutov, Sh.Sh., Machida, T., Pestunov, D.A., Ptashnik, I.V., Rasskazchikova, T.M., Savkin, 77D.E., Sasakawa, M., Simonenkov, D.V.,

Sklyadneva, T.K., Tolmachev, G.N., Fofonov, A.V. (2022) Karbonovye poligony IOA SO RAN dlya issledovaniya dinamiki parnikovyh gazov v atmosfere. Chast' 2 [Carbon landfills of the IAA SB RAS for the study of greenhouse gas dynamics in the atmosphere. Part 2], *Sistemy kontrolya okruzhayushchej*, no. 4 (50), pp. 61-69, doi: 10/33075/2220-5861-2022-4-61-69.

Antohina, O.Yu., Antohin, P.N., Arshinova, V.G., Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Belan, S.B., Davydov, D.K., Dudorova, N.V., Ivlev, G.A., Kozlov, A.V., Krasnov, O.A., Maksyutov, Sh.Sh., Machida, T., Panchenko, M.V., Pestunov, D.A., Rasskazchikova, T.M., Savkin, D.E., Sasakawa, M., Simonenkov, D.V., Sklyadneva, T.K., Tolmachev, G.N., Fofonov, A.V. (2019) Issledovanie dinamiki koncentracii parnikovyh gazov na territorii Zapadnoj Sibiri [Study of the dynamics of greenhouse gas concentrations in Western Siberia], *Optika atmosfery i okeana*, no. 9, pp. 777-785.

Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Davydov, D.K., Krasnov, O.A., Maksyutov, Sh., Machida, T., Sasakawa, M., Fofonov, A.V. (2018) Osobennosti vertikal'nogo raspredeleniya uglekislogo gaza nad yugom Zapadnoj Sibiri v letnij period [Features of vertical distribution of carbon dioxide over the south of Western Siberia in summer], *Optika atmosfery i okeana*, no. 8, pp. 670-681.

Grigoryev, M.R., Maximov, T.Ch., Maksimov, A.P. (2023) Ekologo-fiziologicheskie osobennosti processa fotosinteza beryozy ploskolistnoj (*Betula platyphylla*) v Yakutii [Ecological and physiological features of photosynthesis process of flat-leaved birch (*Betula platyphylla*) in Yakutia], *X S"ezd obshchestva fiziologov rastenij Rossii "Biologiya rastenij v epohu global'nyh izmenenij klimata". Vserossiyskaya nauchnaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem: Tezisy dokladov* [The 10th Congress of the Russian Society of Plant Physiologists, "Plant Biology in the Era of Global Climate Change." All-Russian scientific conference with international participation, abstracts of papers], Ufa, Russia, p. 120.

Desyatkin, R.V. (2018) Izmenenie klimata i dinamika merzlotnyh ekosistem centra materikovoj kriolitozony Severnogo polushariya [Climate change and dynamics of permafrost ecosystems in the center of the continental cryolithozone of the Northern Hemisphere], *Vestnik Rossijskoj Akademii nauk*, vol. 88, no. 12, pp. 1113-1121, doi: 10.31857/S086958730003190-7.

Kononov, A.V., Maksimov, A.P., Petrov, R.E., Terentyeva, M.P. (2018) Osobennosti uglernodnogo i vodnogo ciklov lesnyh ekosistem kriolitozony v kontekste global'nogo izmeneniya klimata. Mekhanizmy ustojchivosti rastenij i mikroorganizmov k neblagopriyatnym usloviyam sredy [Features of carbon and water cycles of forest ecosystems of cryolithozone in the context of global climate change. Mechanisms of resistance of plants and microorganisms to unfavorable environmental conditions], *Sbornik materialov Godichnogo sobraniya Obshchestva fiziologov rastenij Rossii Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem i shkoly molodyh uchenyh, V 2-h chastyah* [Mechanisms of plant and microorganism resistance to adverse environmental conditions, Collection of materials from the Annual Meeting of the Russian Society

of Plant Physiologists, the All-Russian scientific conference with international participation and the school for young scientists], pp. 492-495, URL: <https://doi.org/10.31255/978-5-94797-319-8-492-4951>.

Maximov, T.Ch. (2007) *Krugovorot ugleroda v listvennichnyh lesah yakutskogo sektora kriolitozony* [Carbon cycle in the larch forests of the Yakut cryolithozone sector], Extended abstract of Doctor's thesis, Institut lesa im. V. N. Sukacheva, Krasnoyarsk, Russia, 324 p.

Maksimov, T.Ch. (2023) Osobennosti uglerodnogo gazoobmena ekosistem kriolitozony v kontekste global'nogo izmeneniya klimata [Features of carbon gas exchange of cryolithozone ecosystems in the context of global climate change], *X S"ezd obshchestva fiziologov rastenij Rossii "Biologiya rastenij v epohu global'nyh izmenenij klimata"* [10th Congress of the Russian Society of Plant Physiologists "Plant Biology in the Era of Global Climate Change"], Ufa, Russia, pp. 231-231, URL: <https://doi.org/10.31163/978-5-6047532-1-7>.

Mordovskoy, P.G., Maximov, T.Ch., Grigoryev, M.R., Starostin, E.V., Neustroev, A.A. (2024) Vliyanie povyshennykh koncentracij chernogo ugleroda v atmosfere na fotosintez v list'yah berezy ploskolistnoj (*Betula platyphylla* Sukacz.) v Central'noj Yakutii [Effect of elevated atmospheric black carbon concentrations on photosynthesis in leaves of flat-leaved birch (*Betula platyphylla* Sukacz.) in Central Yakutia], *Biosfera*, vol. 16, no. 1, pp. 30-35.

Petrov, M. I., Fedorov, A.N. (2023) Vliyanie klimaticheskikh uslovij na lesnye pozhary v Central'noj Yakutii [Influence of climatic conditions on forest fires in Central Yakutia], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*, vol. 28, no. 2, pp. 248-260, doi: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-248-260.

Rosgidromet (2022) *Tretij ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii* [The third assessment report of the Russian Hydrometeorological Service on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation] (2022), URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf, (accessed: 14.01.2025).

Timohina, A.V., Prokushkin, A.S., Panov, A.V., Kolosov, R.A., Sidenko, N.V., Lavrich, J., Hajmann, M. (2018) Mezhdunarodnaya izmenchivost' koncentracii dioksida ugleroda v atmosfere nad central'noj chast'yu Sibiri (po dannym mezhdunarodnoj observatorii ZOTTO za 2009 -2015 gg.) [Interannual variability of carbon dioxide concentration in the atmosphere over the central part of Siberia (according to the international ZOTTO Observatory for 2009-2015)], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 20-28.

Timohina, A.V., Prokushkin, A.S., Onuchin, A.A., Panov, A.V., Kofman, G.B., Verhovec, S.V., Hajmann, M. (2015) Mnogoletnij trend koncentraci CO₂ v prizemnoj atmosfere nad Central'noj Sibir'yu [Long-term trend of CO₂ concentration in the surface atmosphere over Central Siberia], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 3, pp. 58-64.

Shepelev, A.G., Grigoryev, M.R., Cherepanova, A.M., Maximov, T.Ch., Fedorov, A.N. (2024) Analiz zapasov ugleroda v podstilke i pochve Prilenskogo plato [Analysis of carbon stocks in litter and soil of the Prilensky Plateau], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики*, vol. 29, no. 3, pp. 397-407, URL: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-397-407>.

Belikov, D., Arshinov, M., Belan, B., Sasakawa, M., Machida, T., Davydov, D., Fofonov, A. (2019) Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO₂ and CH₄ at tower network in Siberia from 2005 to 2016, *Atmosphere*, no. 10(11), pp. 1-18, URL: <https://doi.org/10.3390/atmos10110689>.

IPCC (2021) *Climate change 2021: The physical science basis [Report]*, URL: https://ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SP-M_Russian.pdf (accessed 14.01.2025).

Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirokuni, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, T., Ishikawa, K., Ogawa, T. (2008) Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines, *Atmospheric and Oceanic Technology*, no. 25(10), pp. 1744-1754, URL: <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1082.1>.

Sasakawa, M., Tsuda, N., Machida, T., Arshinov, M., Davydov, D. (2024) Working standard gas saving system for in-situ CO₂ and CH₄ measurements and calculation method for concentrations and their uncertainty, *Atmospheric Measurement Techniques*, no. 17, pp. 1-18, URL: <https://doi.org/10.5194/amt-2023-246>.

Статья поступила в редакцию (Received): 16.06.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 14.01.2026.

Для цитирования / For citation:

Алексеева, А.В., Григорьев, М.Р., Старостин, Е.В., Петров, Р.Е., Мордовской, П.Г., Максимов Т.Х. (2026) Динамика концентрации CO₂ по данным самолетных наблюдений над Центральной Якутией за 2018-2020 гг., *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 66-80, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-66-80.

Alekseeva, A.V., Grigoryev, M.R., Starostin, E.V., Petrov, R.E., Mordovskoy, P.G., Maximov T.Ch. (2026) Dynamics of CO₂ concentration: Aircraft measurements over Central Yakutia during (2018-2020), *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVII, no. 1-2, pp. 66-80, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-66-80.