

УДК 551.510.42

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ CO_2 И CH_4 В АТМОСФЕРЕ СРЕДНЕТАЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМ СИБИРИ¹

© 2015 г. А.В. Тимохина*, А.С. Прокушкин*, А.В. Панов*,
А.А. Онучин*, М. Хайманн**

* Институт леса имени В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия; nastimoti@mail.ru

** Институт биогеохимии им. Макса Планка, Германия; Martin.Heimann@bgc-jena.mpg.de

Поступила в редакцию 30.10.2014 г.

Представлены градиентные измерения концентрации атмосферного углекислого газа и метана в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири по результатам пятилетнего мониторинга (2009–2014 гг.) на обсерватории “ЗОТТО”. Особенности изменения содержания диоксида углерода и метана по профилю высот до 301 м объясняются как суточной и сезонной спецификой функционирования наземных экосистем, так и атмосферными процессами. Показано, что в холодное время года концентрации CO_2 и CH_4 в приземной атмосфере изменяются синхронно и определяются их источниками и погодными условиями. Обсуждаются особенности сезонного хода концентрации CO_2 и CH_4 . Сопоставлены результаты измерений концентрации метана в районе обсерватории “ЗОТТО” с таковыми, полученными в других районах Сибири на аналогичной широте и на фоновых станциях России.

Ключевые слова: концентрация CO_2 и CH_4 , средняя тайга Сибири, мониторинг, суточная и сезонная динамика, антропогенная эмиссия парниковых газов.

Введение. Углекислый газ (CO_2) и метан (CH_4) относятся к основным парниковым газам (ПГ) атмосферы. Содержание CO_2 в атмосфере увеличилось на 25% с начала прямых инструментальных измерений, инициированных Ч.Д. Киллингом на станции Мауна Лоа (Mauna Loa) в 1958 г. [14]. В научном сообществе нет однозначного мнения относительно наблюдаемого роста концентрации CO_2 в глобальном масштабе – связан ли этот процесс с естественными многолетними колебаниями, либо происходит за счет возрастающего объема поступлений из антропогенных источников, составляющего до 9.5 ПгС в 2010 г. [19]. По данным авторов [11, 10, 22] концентрация CH_4 также экспоненциально возрастала в течение этого времени до периода ее стабилизации (1999–2006 гг.). Эта стабилизация обусловлена, по их мнению, сокращением

антропогенной эмиссии CH_4 (на 10 Тг с 1990 по 1995 г.) на территории бывшего Советского Союза, и, снижением выделения метана из северных болотных экосистем. Начиная с 2007 г. концентрация CH_4 вновь начала возрастать [20]. Предположительно это связано с увеличением его природной эмиссии на заболоченных территориях и в зоне распространения мерзлотных почв в результате изменения их температурного режима (потепление на 4 °С по сравнению с 1990–1991 гг.) и увеличения осадков на территории Сибири [22, 12].

Надежные оценки баланса парниковых газов, основанные на модельных экспериментах, требуют верификации математических расчетов прямыми высокоточными инструментальными измерениями, в частности, концентрации атмосферного CO_2 и CH_4 . В Российской Федерации государственная система мониторинга за содержанием ПГ не развита в достаточной мере и включает всего четыре станции Росгидромета: Териберка (Кольский п-ов), Тикси (Якутия), Новый Порт (п-ов Ямал) и Воейково (Ленинградская обл.), где выполняется отбор воздуха в стеклянные емкости один раз в неделю [4, 8]. Система-

¹ Оценка суточного и сезонного хода концентраций CO_2 и CH_4 в приземной атмосфере над среднетаежными экосистемами Сибири выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 14-24-00113).

Работа А.В. Панова выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки российских ученых (МК-1691.2014.5).

тические измерения концентрации ПГ также проводятся в рамках различных научных программ, однако они охватывают небольшие по площади территории [2, 4, 22]. Наиболее крупная сеть наблюдений “JR-STATION” создана в Западной Сибири в результате российско-японского сотрудничества [22]. Несмотря на эти усилия значительная часть территории Евразии остается малоизученной с точки зрения пространственного и временного изменения концентрации рассматриваемых газов. В целях расширения сети наблюдения в 2006 г. в Сибири (Красноярский край, 60°48' с.ш., 89°21' в.д., 114 м над у. м.) была создана научная обсерватория **Zotino Tall Tower Observatory** (“ZOTTO”), где мониторинг ПГ проводится с использованием высотной мачты (301 м) [15]. Этот подход позволяет исследовать относительно однородную часть пограничного слоя атмосферы (ПСА), давая возможность интегральной оценки исследуемых компонентов над значительной территорией (>1000 км²) [13].

Цель данной работы – анализ временной изменчивости концентрации CO₂ и CH₄ в атмосферном воздухе по профилю высот до 301 м в среднетаежной подзоне Сибири по результатам пятилетних наблюдений (май 2009 – май 2014 гг.) на обсерватории “ZOTTO”.

Материалы и методы. Обсерватория “ZOTTO” расположена в среднетаежной подзоне (приенисейская часть) Западной Сибири на левом берегу р. Енисей. Тип климата – континентальный с суровой снежной зимой и умеренно-теплым влажным летом. По данным метеостанции Бор (в 100 км севернее обсерватории “ZOTTO”), среднегодовая температура воздуха равна –3.7 °С, средняя температура января –24.2 °С, июля +17.8 °С, годовое количество осадков 536 мм.

Район исследований, согласно лесорастительному районированию, относится к Сымско-Дубческому округу среднетаежных лесов [6]. Значительную часть округа занимают сильно обводненные болота и озера (около 60% территории), среди которых произрастают сосновые и темнохвойные насаждения. В условиях пониженного рельефа развиты бруснично-лишайниковые и зеленомошные боры. На участках, граничащих с болотами, широко распространены заболоченные и болотные олиготрофные кустарничково-сфагновые сосняки [3]. В результате комплексных инвентаризационных исследований, проведенных в радиусе 100 км вокруг высотной мачты, установлено, что преобладающими типами леса являются ельники и пихтачи зеленомошные (46.0%), представленные, главным образом, насаждения-

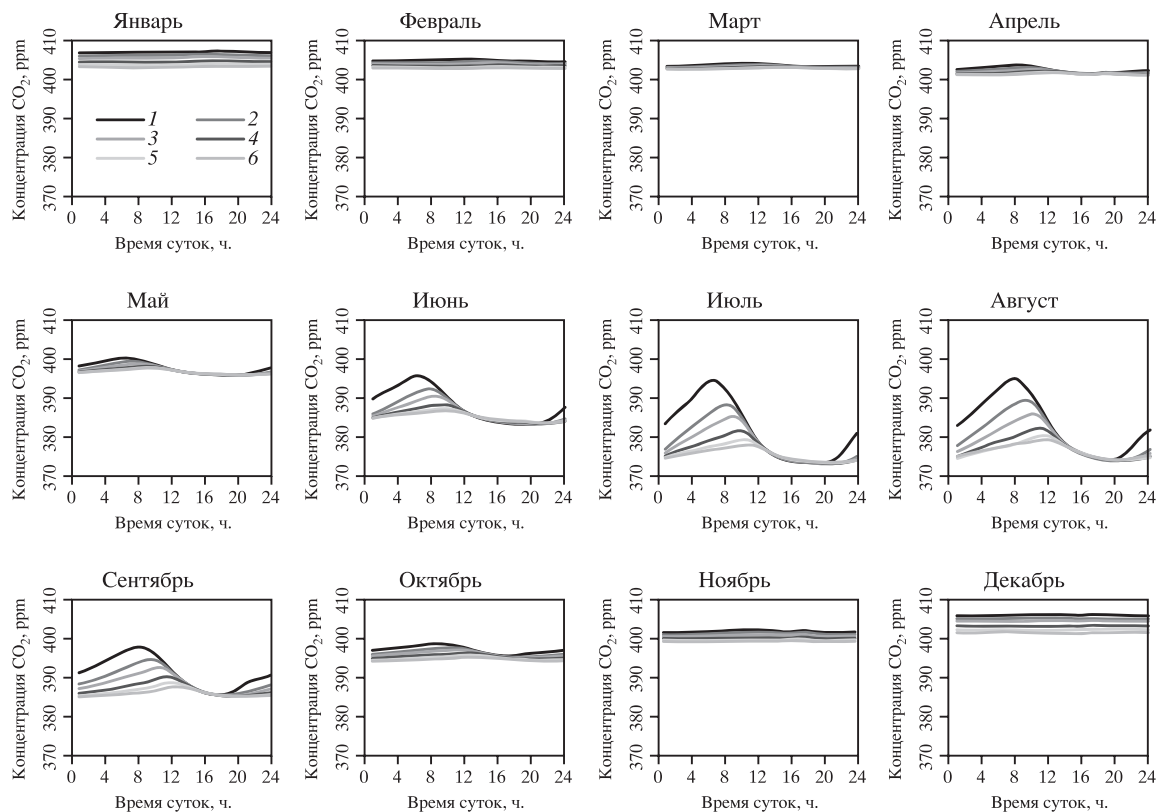
ми на заключительной стадии послепожарного восстановления и возрастом более 130 и 160 лет соответственно; березняки и осинники (12.3%), образованные разновозрастными насаждениями от 40–60 (лиственные молодняки с подростом хвойных) до более 90 лет (смешанные темнохвойно-лиственные насаждения с преобладанием лиственных пород); и болотные экосистемы (10.5%). Дополнительную мозаичность в биогеоценотический покров территории вносят сосняки зеленомошные (8.3%), сосняки лишайниковые (7.6%), состоящие из перестойных насаждений (более 200 лет) и кедрachi зеленомошные (1.8%). На вырубке и гари приходится соответственно 2.6 и 5.1% территории [5]. Основной фон в структуре почвенного покрова автоморфных позиций составляют подзолы [7]. Многолетняя мерзлота в почвенных разрезах не обнаружена.

Ближайшие населенные пункты (п. Зотино, п. Ворогово и другие) расположены более чем в 25 км от обсерватории “ZOTTO”, где общая численность населения не превышает 3000 человек, отсутствует также какое-либо производство. Крупный город Красноярск с населением более 1 млн человек находится на расстоянии 700 км в южном направлении. Поэтому из-за низкой плотности населения и достаточной удаленности района исследования от крупных промышленных центров, влияние антропогенного фактора невелико, однако значительная часть территории подвержена периодическому влиянию природных пожаров.

Круглогодичный мониторинг за концентрацией CO₂ и CH₄ в приземном слое воздуха проводится с помощью комплекса измерительного оборудования на базе обсерватории “ZOTTO” с мая 2009 г. Измерительная система включает воздухозаборники, расположенные на шести высотах металлической мачты (4, 52, 92, 156, 227 и 301 м), и газоаналитический комплекс EnviroSense 3000i (Picarro Inc., США), установленный в лаборатории у основания мачты. Метеорологические параметры (температура воздуха и атмосферное давление) регистрировались стационарными датчиками температуры воздуха (MELA Sensortechnik, Германия) и атмосферного давления (R.M. Young Company, США) на шести высотах мачты (4, 52, 92, 156, 227 и 301 м). Подробно экспериментальная установка описана ранее [25].

В настоящей работе приведены данные градиентных измерений содержания диоксида углерода и метана, полученные в период с 1 мая 2009 г. по 1 мая 2014 г. Для оценки сезонной и годовой изменчивости концентрации исследуемых газов

А



Б

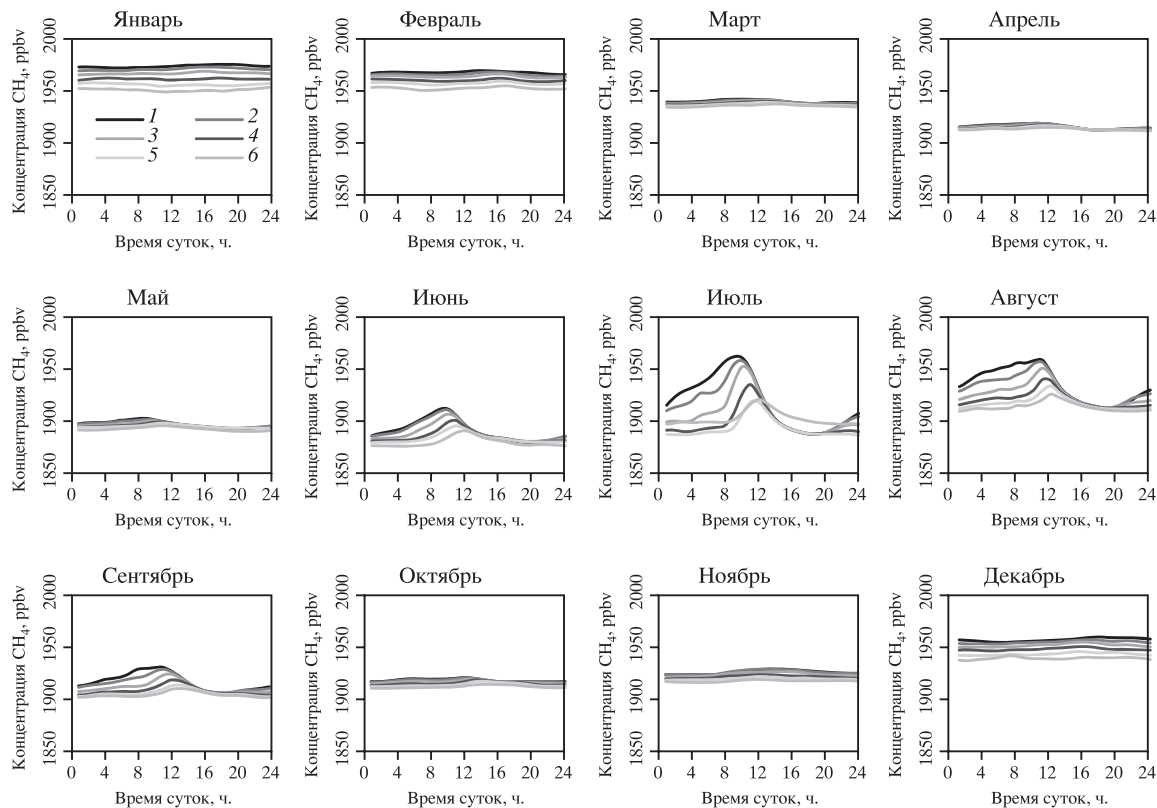


Рис. 1. Динамика суточной концентрации CO_2 (А) и CH_4 (Б) в атмосфере на разных высотах (обсерватория “ЗОТТО”) в отдельные месяцы года для пятилетнего периода измерений (май 2009 г. – май 2014 г.). 1–6 – высота измерительного уровня: 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м соответственно.

были использованы только дневные измерения, усредненные с 13:00 ч до 17:00 ч местного времени. Рассматриваемый временной период характеризуется полным перемешиванием воздуха во всей толще ПСА, поэтому вертикальный градиент концентрации CO₂ и CH₄ по высотному профилю близок к 0. Кроме того, использование такого способа расчета позволяет исключить завышение средних значений концентраций исследуемых газов, связанное с их накоплением (ночное дыхание растительного покрова и эмиссия CH₄ из болотных экосистем) в приземном воздухе при температурной инверсии. Наиболее информативной для оценки динамики CO₂ и CH₄ в приземном слое атмосферы является высота 301 м, которая и была нами выбрана. Усредненные дневные значения затем использовались для получения сглаженных кривых временного хода концентрации CO₂ и CH₄ с помощью специально разработанного метода для анализа длительных наблюдений за концентрацией ПГ [24].

Результаты и их обсуждение. Наиболее выраженные изменения концентрации исследуемых газов по профилю высоты в течение суток наблюдаются в теплое время года, а для холодного периода характерны незначительные различия (рис. 1). На протяжении годового цикла период со значительными суточными колебаниями содержания диоксида углерода в атмосфере продолжительнее по сравнению с таковым для метана на 2 месяца. Так, накопление CO₂ в ночные часы и его снижение в дневные часы начинает проявляться уже в апреле, а заканчивается только в октябре, для метана эти сроки сдвинуты на май и сентябрь, соответственно. Этот временной сдвиг, вероятно, связан с тем, что физиологическая деятельность растительности в районе исследования (поглощение CO₂) продолжительнее, чем активность анаэробных метаногенных бактерий (выделение CH₄). Максимальная величина суточной амплитуды для обоих исследуемых газов наблюдается в июле, около поверхности земли (4 м), и составляет в среднем 21 ppm и 60 ppbv для CO₂ и CH₄ соответственно.

Изменения концентрации CO₂ в течение суток в теплое время года определяются главным образом газообменом диоксида углерода между экосистемами и атмосферой, а именно, процессами фотосинтеза (поглощение) и дыхания (выделение) [23, 16]. Интенсивность эмиссий метана из болотных экосистем на протяжении суток примерно одинакова либо может незначительно возрастать в дневное время в летний период [18]. На формирование суточного хода концентрации исследуемых газов существенное влияние оказы-

вает также динамика высоты ПСА. Так, в ночное время образуется устойчивый пограничный слой, который характеризуется малой высотой, обычно не превышающей 150–200 м и низкой интенсивностью вертикального переноса [9]. В связи с этим концентрация CO₂ и CH₄ постепенно нарастает внутри слоя. Суточный максимум атмосферной концентрации CO₂ регистрируется в 6:00 – 7:00 ч местного времени, тогда как пик концентрации CH₄ приходится на период 7:00 – 10:00 ч. Смещение утренних пиков в содержании исследуемых газов объясняется тем фактом, что фотосинтез (поглощение CO₂) запускается до того, как начинается перемешивание ПСА [22]. После восхода солнца происходит разрушение стабильной температурной инверсии и увеличение высоты ПСА, а обогащенный парниковыми газами воздух начинает перемешиваться. В течение дня, преимущественно во второй его половине, высота ПСА достигает 3000 м [17]. Минимум концентраций фиксировался в вечерние часы (16:00–19:00 ч). На верхней высоте измерений (301 м) суточные колебания концентраций CO₂ и CH₄ в течение всего года выражены относительно слабо, что свидетельствует об ослаблении с высотой сигнала биогеоценозов подстилающей поверхности. Вместе с тем, однако, прослеживается незначительное увеличение их уровня в утренние часы в летний период, когда происходит проникновение восходящих потоков приземного воздуха с повышенным содержанием диоксида углерода и метана в верхний слой приземной атмосферы.

В холодный период года (ноябрь – февраль) суточные колебания содержания диоксида углерода и метана существенно отличаются от остальных сезонов. Кроме того, концентрации CO₂ и CH₄ в приземной атмосфере в это время года ведут себя аналогично, как это показано на примере декабря 2011 г. (рис. 2), а также подтверждается высоким коэффициентом корреляции между исследуемыми газами (таблица). Данный факт свидетельствует о том, что зимой флуктуации концентрации исследуемых газов определяются, главным образом, погодными условиями [22]. Под воздействием Сибирского антициклона на территории исследования формируются особые метеорологические условия: атмосферное давление превышает 1020 гПа, температура воздуха около поверхности земли снижается до минус 28 °С, при этом с увеличением высоты она возрастает (–18 °С на высоте 301 м). Такие условия приводят к расслоению приземной атмосферы и ограничению перемешивания воздуха. Как следствие, на нижних высотах наблюдается существенное увеличение содержания диоксида углерода (+20 ppm)

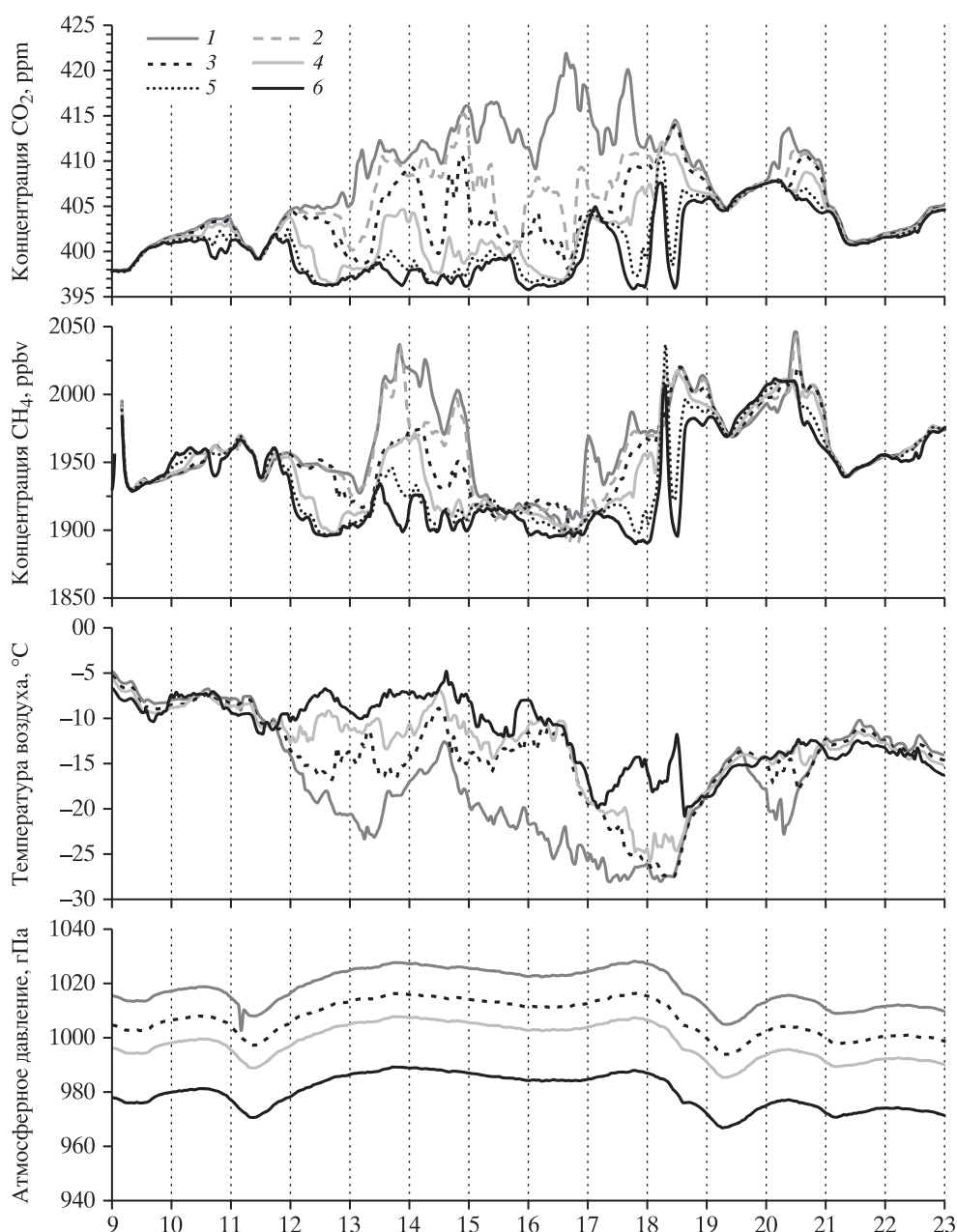


Рис. 2. Концентрации CO_2 и CH_4 , температура воздуха и давление в приземной атмосфере на разных высотах в зимний период (на примере, 9–23 декабря 2011), обусловленные сибирским антициклоном. 1–6 – высота измерительного уровня: 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м соответственно.

и метана (+100 ppbv) по сравнению с верхними. Интенсивный рост концентрации исследуемых газов при температурных инверсиях в холодное время может быть обусловлен их накоплением около поверхности земли за счет зимней эмиссии.

Динамика концентрации CO_2 в атмосферном воздухе в районе обсерватории “ZOTTO” за пятилетний период наблюдений имела ярко выраженную сезонную периодичность с максимумами в зимний и минимумами в летний периоды.

Начало снижения содержания диоксида углерода фиксируется, как правило, в апреле–мае в период запуска фотосинтетической активности в районе обсерватории и продолжается до конца июля – начала августа, когда достигает минимума. При этом для всего периода наблюдений регистрируется устойчивое возрастание концентраций CO_2 в атмосфере. Так, с начала наших измерений минимальные концентрации возросли на 14 ppm: с 367.3 ± 1.5 ppm в 2009 г. до 382.4 ± 2.4 ppm в 2013 г. Начиная с августа, несмотря на продолжающуюся

Таблица 1. Коэффициенты корреляции часовых значений концентрации CO₂ и CH₄ на высоте 301 м для холодного периода (ноябрь–февраль) за пятилетний период измерений

Год	Коэффициент корреляции (κ)	Коэффициент детерминации (R^2)
2010	0.75*	0.56
2011	0.82*	0.68
2012	0.81*	0.66
2013	0.61*	0.37
2014	0.76*	0.58
2010–2014	0.65*	0.43

* Достоверны при $p < 0.05$.

ся ассимиляцию CO₂ растительным покровом, наблюдается нарастание его концентрации в атмосфере, что свидетельствует о превышении поглощения респирационным потоком в этот период. Накопление CO₂ в атмосфере происходит вплоть до марта. Тем не менее, пиковых концентраций CO₂, по данным обсерватории “ZOTTO”, достигает в декабре–январе. Подобно динамике летних концентраций мы наблюдаем ежегодный рост CO₂ и в зимний период: от 397.2 ± 2.7 ppm в 2010 г. до 407.6 ± 2.7 ppm в 2014 г. Сравнительный анализ прироста концентраций CO₂ в летний (15 ppm/5 лет) и зимний (10 ppm/5 лет) периоды свидетельствует о значительно более выраженном их росте в течение вегетационного сезона. Причины, способствующие большему нарастанию концентраций CO₂ в теплое время года по сравнению с холодным, будут выявлены в дальнейших исследованиях.

Результаты наблюдений в районе обсерватории “ZOTTO” позволили оценить годовую амплитуду

колебаний концентрации CO₂ для среднетаежной подзоны Сибири на основе непрерывных высокочастотных наблюдений. Ее величина с мая 2009 г. по март 2014 г. варьировала незначительно – от 29.9 ppm в 2009 до 25.2 ppm в 2013, составляя в среднем 28.2 ± 1.3 ppm. Полученные результаты согласуются с ранее приведенными оценками (22–28 ppm) [15, 17, 25]. Близкие величины годовой амплитуды концентрации CO₂ (24–30 ppm) для территории Западной Сибири показаны в работе, обобщающей данные сети мониторинга ПГ “JR-STATION” [1].

В отличие от поведения в годовом цикле атмосферного CO₂, концентрации CH₄ в атмосфере в районе обсерватории “ZOTTO” имеют два ярко выраженных максимума – в летний (август) и зимний (январь–февраль) периоды. Возрастание концентрации CH₄ в летний период фиксируется с середины июня, когда температура почвы увеличивается, что способствует нарастанию активности метаногенных микроорганизмов, а достигает своего пика в августе, отражая сезонный максимум эмиссий CH₄ из болотных экосистем. За исследуемый пятилетний период среднее содержание атмосферного метана в августе возросло от 1900 ± 45 ppb в 2009 г. до 1941 ± 52 ppb в 2013 г. В октябре уровень метана в атмосфере вновь начинает увеличиваться до своего зимнего максимума в январе–феврале. В отличие от концентрации CO₂ в зимний период, в содержании атмосферного CH₄ не отмечается устойчивого ежегодного прироста. Так, в 2010–2011 гг. оно сохранялось на уровне 1935–1945 ppb, а с 2012 г. возросло до 1964–1967 ppb.

Годовой ход концентрации CH₄ в районе обсерватории “ZOTTO” хорошо согласуется с ранее показанным для различных постов Западной

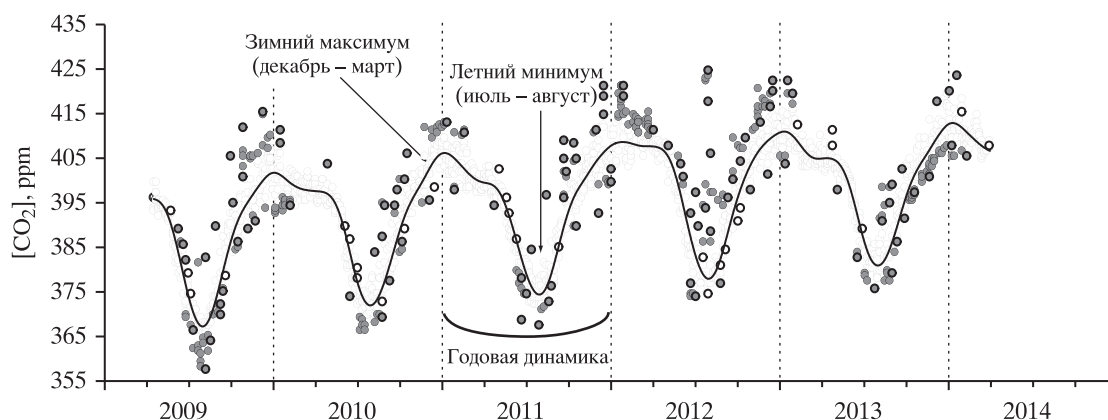


Рис. 3. Динамика дневных концентраций атмосферного CO₂ на обсерватории “ZOTTO” за период измерений (май 2009 – май 2014). Белыми точками обозначены дневные средние (13:00–17:00 ч) концентрации CO₂, серыми точками – дневные средние концентрации CO₂, лежащие за пределами 2σ, черная кривая – выровненная суточная динамика.

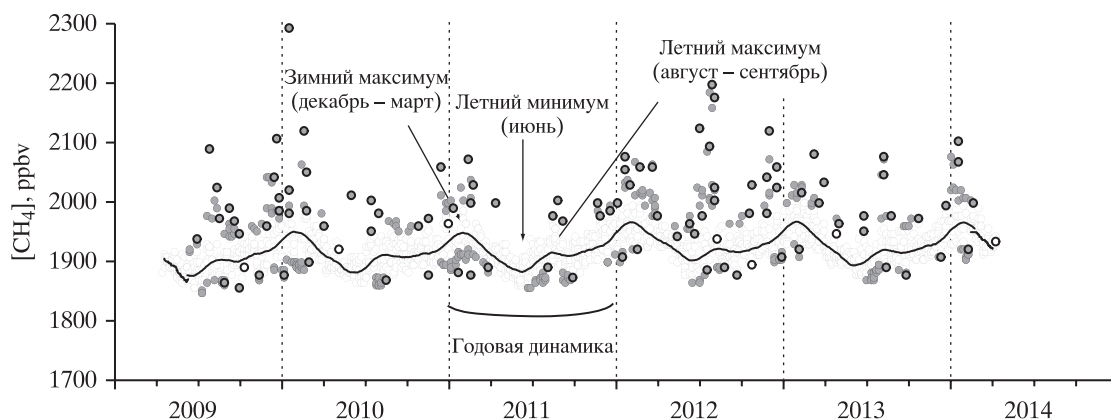


Рис. 4. Динамика дневных концентраций атмосферного CH_4 на обсерватории “ZOTTO” за период измерений (май 2009 – март 2014). Белыми точками обозначены дневные средние (13:00–17:00 ч) концентрации CH_4 , серыми точками – дневные средние концентрации CH_4 , лежащие за пределами 2σ , черная кривая – выровненная суточная динамика.

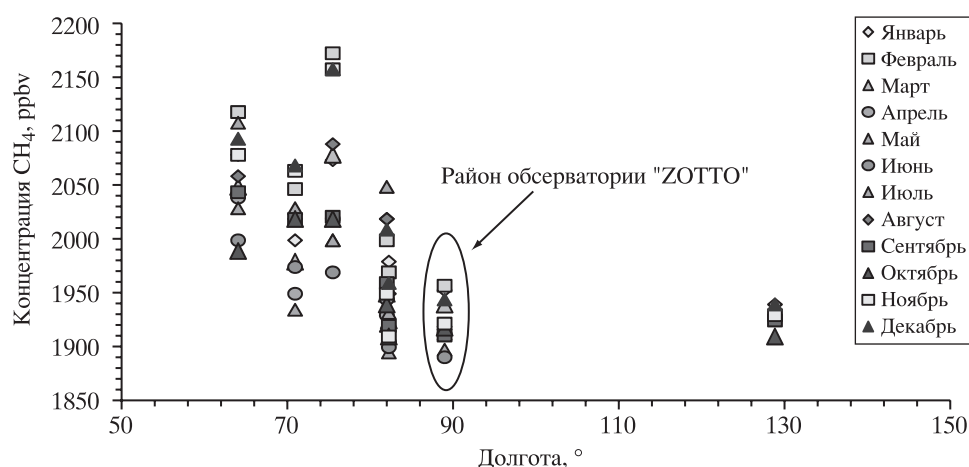


Рис. 5. Изменение концентрации CH_4 по долготному градиенту.

Сибири, где также прослеживаются два максимума – в летний и зимний периоды. В то же время летний минимум концентрации CH_4 в некоторых районах Западной Сибири может регистрироваться раньше – в мае, как например на посту “Демьянское” [22]. При этом сравнение среднетаежной подзоны с другими районами Сибири (широтный диапазон от 58° до 63°) по среднемесячным значениям содержания метана в атмосфере [22] выявило общую тенденцию к его снижению в восточном направлении от 65° до 130° в.д. (рис. 5).

В связи с этим среднегодовое содержание метана в районе обсерватории ниже, чем в других районах Западной Сибири, что согласуется с сокращением площадей заболоченных территорий при продвижении на восток от Енисея. Также необходимо отметить, что среднегодовые значения концентрации CH_4 (1911.9–1913.9 ppbv) для тех лет, когда в исследуемом районе не регистрировались пожары (2010–2011 гг.), мало отличаются

от уровня метана, показанного для фоновых условий России на станциях Териберка (1906.1–1906.8 ppbv) и Тикси (1913.2 ppbv) [8].

Заключение. В результате проведенной работы установлено, что в теплое время года концентрация как CO_2 , так и CH_4 имеют выраженную суточную динамику. Ее амплитуда максимальна на высоте 4 м (около поверхности земли) и практически отсутствует на высоте 301 м. Для обоих исследуемых газов показано формирование вертикального градиента в концентрациях ночью и его отсутствие днем, как следствие суточной динамики функционирования лесных биогеоценозов и состояния пограничного слоя атмосферы. В холодное время года стратификация приземной атмосферы под влиянием Сибирского антициклона определяет идентичное поведение концентраций CO_2 и CH_4 по вертикальному профилю измерений.

Показано, что в среднетаежной подзоне Сибири концентрация CH₄ имеет два годовых пика – в зимнее (январь–февраль) и летнее (август) время. Максимальные концентрации CO₂ фиксировались с декабря по март, а минимальные – в июле. Установлено, что зимнее содержание метана за исследуемый период изменялось незначительно: от 1935–1945 ppb в 2010–2011 гг. до 1964–1967 ppb в 2012 г., в отличие от содержания диоксида углерода, которое увеличилось: от 397.2±2.7 ppm в 2010 г. до 407.6±2.7 ppm в 2014 г. Летние концентрации исследуемых газов возросли с 367.3±1.5 ppm в 2009 г. до 382.4±2.4 ppm в 2013 г. для CO₂ и с 1900±45 ppb в 2009 г. до 1941±52 ppb в 2013 г. для CH₄.

Сезонная динамика концентрации CH₄ в районе обсерватории “ЗОТТО” хорошо согласуется с ранее показанной для разных постов Западной Сибири, но при существенно меньших среднемесячных значениях, что отражает общую тенденцию к снижению содержания метана в атмосфере в восточном направлении от 65° до 130° в.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К. и др. Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 22. № 12. С. 1051–1061.
2. Баранов Ю.И., Бугрим Г.И., Вишератин К.Н. и др. Комплексный мониторинг содержания метана, закиси азота, окиси и двуокиси углерода в приземном воздухе атмосферы города // Тр. регион. конкурса научн. проектов в области естественных наук. 2010. Вып. 2. Калужский научный центр. С. 552–557.
3. Карпенко Л.В., Прокушкин А.С., Корец М.А. Территориальные особенности болот северной части Сым-Дубческого междуречья (Красноярский край) // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 9. С. 103–111.
4. Киселев А.А., Решетников А.И. Метан в Российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов // Пробл. Арктики и Антарктики. 2013. № 6. Вып. 96. С. 5–15.
5. Климченко А.В., Верховец С.В., Слинкина О.А. и др. Запасы крупных древесных остатков в среднетаежных экосистемах Приенисейской Сибири // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 91–97.
6. Коротков И.А. Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // Углерод в экосистемах лесов и болот России. 1994. Красноярск: ИЛ СО РАН, С. 29–47.
7. Лесные экосистемы Енисейского меридиана / Под ред. Плешикова Ф.И., Ваганова Е.А., Ведровой Э.Ф. и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 356 с.
8. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2012 год // Росгидромет, 2013. 178 с.
9. Bakwin P.S., Tans P.P., Hurst D.F. et al. Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program // Tellus. 1998. № 50B. P. 401–415.
10. Bousquet P., Ciais P., Miller J.B. et al. Contribution of anthropogenic and natural source to atmospheric methane variability // Nature. 2006. Issue 443. P. 439–443.
11. Dlugokencky E.J., Houweling S., Bruhwiler L. et al. Atmospheric methane levels off: temporary pause or a new steady-state? // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 19. DOI: 10.1029/2003GL018126.
12. Dlugokencky E.J., Bruhwiler L., White J.W.C. et al. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. DOI: 10.1029/2009GL039780.
13. Gloor M., Bakwin P., Hurst D. et al. What is the concentration footprint of a tall tower? // J. Geophys. Res. 2001. № 106(D16). P. 1783–1784.
14. Keeling C.D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere // Tellus. 1960. V. 12. № 2. P. 200–203.
15. Kozlova E.A., Manning A.C., Kisilyakhov Y. et al. Seasonal, synoptic, and diurnal scale variability of biogeochemical trace gases and O₂ from a 300-m tall tower in central Siberia // Global Biogeochemical Cycles. 2008. № 22. P. 1–16. DOI: 10.1029/2008GB003209.
16. Lloyd J., Shibistova O., Zolotoukhine D. et al. Seasonal and annual variations in the photosynthetic productivity and carbon balance of a Central Siberian pine forest // Tellus. 2002. № 54B. P. 590–610.
17. Lloyd J., Langenfelds R.L., Francey R.J. et al. A trace-gas climatology above Zotino, Central Siberia // Tellus. 2002. № 54B. P. 749–767.
18. Long K.D., Flanagan L.B., Cai T. Diurnal and seasonal variation in methane emission in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance // Global change biology. 2010. № 16. P. 2420–2435.
19. Peters G.P., Marland G., Le Quere et al. Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008–2009 global financial crisis // Nature Climate Change. 2012. № 2. P. 2–4.
20. Rigby M., Prinn R.G., Fraser P.J. et al. Renewed growth of atmospheric methane // Geophys. Res. Lett. 2008. № 35. DOI: 10.1029/2008GL036037.
21. Sasakawa M., Ito A., Machido T. et al. Annual variation of CH₄ emission from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005–2009): a case of high CH₄ flux and precipitation rate in the summer of 2007 // Tellus B. 2012. № 64. DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.17514.
22. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T. et al. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia // Tellus. 2010. V. 62B. P. 403–416.

23. Shibistova O., Lloyd J., Zrazhevskaya G. et al. Seasonal and spatial variability in soil CO₂ efflux rates for a Central Siberian *Pinus sylvestris* forest // *Tellus*. 2002. № 54B. P. 552–567.
24. Thoning K.T., Tans P., Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa observatory 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974–1985 // *J. geophys. Res.* 1989. № D6. V. 94. P. 8549–8565.
25. Winderlich J. Setup of a CO₂ and CH₄ measurement system in Central Siberia and modeling of its results // Technical report № 26. Hamburg. 2011. P. 120.
11. Dlugokencky E.J., Houweling S., Bruhwiler L. et al. Atmospheric methane levels off: temporary pause or a new steady-state? *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, no. 19. doi: 10.1029/2003GL018126
12. Dlugokencky E.J., Bruhwiler L., White J.W.C. et al. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, vol. 36. doi: 10.1029/2009GL039780
13. Gloor M., Bakwin P., Hurst D. et al. What is the concentration footprint of a tall tower? *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2001, no. 106(16), pp. 1783–17840.
14. Keeling C.D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, 1960, vol. 12, no. 2, pp. 200–203.
15. Kozlova E.A., Manning A.C., Kisilyakhov Y. et al. Seasonal, synoptic, and diurnal scale variability of biogeochemical trace gases and O₂ from a 300-m tall tower in central Siberia. *Global Biogeochem. Cycles*, 2008, no. 22, pp. 1–16. doi: 10.1029/2008GB003209
16. Lloyd J., Shibistova O., Zolotoukhine D. et al. Seasonal and annual variations in the photosynthetic productivity and carbon balance of a central Siberian pine forest. *Tellus B*, 2002, vol. 54, pp. 590–610.
17. Lloyd J., Langenfelds R.L., Francey R.J. et al. A trace-gas climatology above Zotino, Central Siberia. *Tellus B*, 2002, vol. 54, pp. 749–767.
18. Long K.D., Flanagan L.B., and Cai T. Diurnal and seasonal variation in methane emission in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance. *Global Change Biol.*, 2010, no. 16, pp. 2420–2435.
19. Peters G.P., Marland G., Le Quere C. et al. Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008–2009 global financial crisis. *Nat. Climate Change*, 2012, no. 2, pp. 2–4.
20. Rigby M., Prinn R.G., Fraser P.J. et al. Renewed growth of atmospheric methane. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, no. 35. doi: 10.1029/2008GL036037
21. Sasakawa M., Ito A., Machido T. et al. Annual variation of CH₄ emission from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005–2009): a case of high CH₄ flux and precipitation rate in the summer of 2007. *Tellus*, 2012, vol. 64. doi: 10.3402/tellusb.v64i0.17514
22. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T. et al. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia. *Tellus B*, 2010, vol. 62, pp. 403–416.
23. Shibistova O., Lloyd J., Zrazhevskaya G. et al. Seasonal and spatial variability in soil CO₂ efflux rates for a central Siberian *Pinus sylvestris* forest. *Tellus B*, 2002, vol. 54, pp. 552–567.
24. Thoning K.T., Tans P., and Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa observatory 2. Analysis of the NOAA/GMCC data, 1974–1985. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 1989, no. 6, vol. 94, pp. 8549–8565.
25. Winderlich J. Setup of a CO₂ and CH₄ measurement system in Central Siberia and modeling of its results, in *Technical Report No. 26*. Hamburg, 2011, p. 120.

REFERENCES

1. Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K. et al. The dynamics in vertical distribution of greenhouse gases in the atmosphere. *Opt. Atmos. Ocean.*, 2012, vol. 25, no. 12, pp. 1051–1061. (In Russ.).
2. Baranov Yu.I., Bugrim G.I., Visheratin K.N. et al. Complex monitoring of concentration of methane, nitrogen oxide, and oxide and dioxide of carbon in surface air of urban air. *Tr. Reg. Konkura Nauch. Proekt. Obl. Estestv. Nauk*, 2010, no. 2, pp. 552–557. (In Russ.).
3. Karpenko L.V., Prokushin A.S., and Korets M.A. Territorial peculiarities of mires in northern part of Sym-Dubchenskoe interfluvium (Krasnoyarsk krai). *Vestn. Krasn. Gos. Agrar. Univ.*, 2012, no. 9, pp. 103–111. (In Russ.).
4. Kiselev A.A. and Reshetnikov A.I. Methane in Russian Arctic: the results of monitoring and calculations. *Probl. Arkt. Antarkt.*, 2013, no. 6, no. 96, pp. 5–15. (In Russ.).
5. Klimchenko A.V., Verkhovets S.V., Slinkina O.A. et al., Reserves of large wood remains in mid-taiga ecosystems of Yenisei River area of Siberia. *Geogr. Prirod. Resur.*, 2011, no. 2, pp. 91–97. (In Russ.).
6. Korotkov I.A. Forest plantation zoning in Russian and Former Soviet countries, in *Uglerod v ekosistemakh lesov i bolot Rossii* (Carbon in Forest and Mire Ecosystems of Russia). Krasnoyarsk: Inst. Lesa, Sib. Otd., Ross. Akad. Nauk, 1994, pp. 29–47. (In Russ.).
7. *Lesnye ekosistemy Eniseiskogo meridiana* (Forest Ecosystems of Yenisei Meridian), Pleshikov F.I., Vaganov E.A., Vedrova E.F. et al., Eds., Novosibirsk: Sib. Otd., Ross. Akad. Nauk, 2002. 356 p.
8. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy v Rossiiskoi Federatsii za 2012 god* (Review of Environmental Status and Pollution in Russian Federation in 2012). Moscow: Rosgidromet Publ., 2013. 178 p.
9. Bakwin P. S., Tans P.P., Hurst D.F. et al. Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program. *Tellus B*, 1998, vol. 50, pp. 401–415.
10. Bousquet P., Ciais P., Miller J.B. et al. Contribution of anthropogenic and natural source to atmospheric methane variability. *Nature*, 2006, no. 443, pp. 439–443.

Temporal Variability of CO₂ and CH₄ Concentration in the Atmosphere of Middle Taiga Ecosystems of Siberia

A.V. Timokhina*, A.S. Prokushkin*, A.V. Panov*, A.A. Onuchin*, and M. Heimann**

* *Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia; nastimoti@mail.ru,*

** *Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena, Germany; martin.heimann@bgc-jena.mpg.de*

The gradient measurements of the concentration of atmospheric carbon dioxide and methane in the middle taiga subzone of the Yenisei region of Siberia based on five years monitoring (2009–2014) at the ZOTTO Observatory are presented. The features of changing of the content of carbon dioxide and methane in the profile heights up to 301 meters is explained by both daily and seasonal specificity of functioning of terrestrial ecosystems and atmospheric processes. It is shown that in the cold season CO₂ and CH₄ concentrations in the surface atmosphere change synchronously and are determined by their sources and weather conditions. The results of measurements of methane concentration are compared with those obtained in other areas of Siberia on similar latitude and with measurements on background stations of Russia.

Keywords: CO₂ and CH₄ concentration, average taiga of Siberia, monitoring, daily and seasonal dynamics, anthropogenic emissions of greenhouse gases.