



ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.510.42

А.В. Тимохина, А.С. Прокушкин, А.В. Панов

СУТОЧНАЯ И СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ CO₂ И CH₄ В АТМОСФЕРЕ НАД ЭКОСИСТЕМАМИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (ПРИЕНИСЕЙСКАЯ ЧАСТЬ)*

Представлены градиентные измерения концентрации атмосферного углекислого газа и метана в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири по результатам пятилетних наблюдений (2009–2014 гг.). В работе обсуждаются особенности суточной и сезонной динамики концентрации CO₂ и CH₄ в районе обсерватории «ZOTTO».

Ключевые слова: атмосферный CO₂ и CH₄, обсерватория «ZOTTO».

A.V. Timokhina, A.S. Prokushkin, A.V. Panov

DAILY AND SEASONAL DYNAMICS OF CO₂ AND CH₄ CONCENTRATION IN THE ATMOSPHERE OVER THE WESTERN SIBERIA (PRI-YENISEYSK PART) ECOSYSTEMS

The gradient concentration measurements of the atmospheric carbon dioxide and methane in the middle taiga subzone of the Pri-Yeniseysk Siberia according to the results of five year observations (2009–2014) are presented. The peculiarities of the daily and seasonal concentration dynamics of CO₂ and CH₄ in the area of "ZOTTO" observatory are discussed in the article.

Key words: atmospheric CO₂ and CH₄, "ZOTTO" observatory

Введение. Углекислый газ (CO₂) и метан (CH₄) относятся к основным парниковым газам (ПГ) атмосферы. Содержание CO₂ в атмосфере увеличилось на 25 % с начала прямых инструментальных измерений, инициированных Ч.Д. Киллингом на станции Мауна Лоа (Mauna Loa) в 1958 году [6]. В научном сообществе не существует однозначного мнения касательно наблюдаемого роста концентрации CO₂ 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 году [10]. По данным авторов [5, 12], концентрация CH₄ также экспоненциально возрастала в течение этого времени до периода ее стабилизации (1999–2006 гг.), который обусловлен, по их мнению, сокращением антропогенной эмиссии CH₄ (на 10 Тг с 1990 по 1995 г.) на территории бывшего Советского Союза и снижением выделения метана из северных болотных экосистем. Начиная с 2007 года концентрация CH₄ вновь начала возрастать [11]. Надежные оценки баланса парниковых газов, основанные на модельных экспериментах, требуют верификации математических расчетов прямыми высокоточными инструментальными измерениями, в частности концентрации атмосферного CO₂ и CH₄. При этом в Российской Федерации государственная система мониторинга за содержанием ПГ не развита в достаточной мере и включает всего четыре станции Росгидромета [3]. Систематические измерения концентрации ПГ также проводятся в рамках различных научных программ, однако они охватывают небольшие по площади территории [12]. Несмотря на эти усилия, значительная часть территории Евразии остается малоизученной с точки зрения пространственного и временного изменения концентрации атмосферного CO₂ и CH₄. В целях расширения сети наблюдения в 2006 году в

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ в рамках научного проекта № 13-05-98053, гранта Президента Российской Федерации для Государственной поддержки молодых российских ученых МК-1691.2014.5.

среднетаежной подзоне Сибири была создана научная обсерватория **Zotino Tall Tower Observatory** («ЗОТТО»), где мониторинг ПГ проводится с использованием высотной мачты (301 м) [14].

Цель работы. Анализ суточной и сезонной изменчивости концентрации CO_2 и CH_4 в атмосферном воздухе по профилю высот до 301 м в среднетаежной подзоне Сибири по результатам пятилетних наблюдений (май 2009 – май 2014 гг.) на обсерватории «ЗОТТО».

Материалы и методы. Обсерватория «ЗОТТО» 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 «ЗОТТО»), среднегодовая температура воздуха равна минус $3,7^\circ\text{C}$, средняя температура января минус $24,2^\circ\text{C}$, июля $+17,8^\circ\text{C}$, годовое количество осадков 536 мм.

Растительный покров района исследования образован сильнообводненными болотами и озерами (около 60 % территории), среди которых произрастают сосновые и темнохвойные насаждения. В условиях пониженного рельефа развиты бруснично-лишайниковые и зеленомошные боры [2]. Основной фон в структуре почвенного покрова автоморфных позиций составляют подзолы. Многолетняя мерзлота в почвенных разрезах не обнаружена.

Ближайшие населенные пункты расположены более чем в 25 км от обсерватории «ЗОТТО», где общая численность населения не превышает 3000 человек, а также отсутствует 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 CO_2 и CH_4 в приземном слое воздуха проводится с помощью комплекса измерительного оборудования на базе обсерватории «ЗОТТО» 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. Подробно экспериментальная установка описана ранее [14].

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 изменчивости концентрации исследуемых газов 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 CO_2 и CH_4 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 CH_4 из болотных экосистем) в приземном воздухе при температурной инверсии. Наиболее информативной для оценки динамики CO_2 и CH_4 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 CO_2 и CH_4 с помощью специально разработанного метода для анализа длительных наблюдений за концентрацией ПГ [13].

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 показано, что период со значительными суточными колебаниями содержания диоксида углерода в атмосфере продолжительнее по сравнению с таковым для метана на 2 месяца. Так, накопление CO_2 в ночные часы и его снижение в дневные часы начинают проявляться уже в апреле, а заканчиваются 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 CO_2) продолжительнее, чем активность анаэробных метаногенных бактерий (выделение CH_4). 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 CO_2 и CH_4 соответственно.

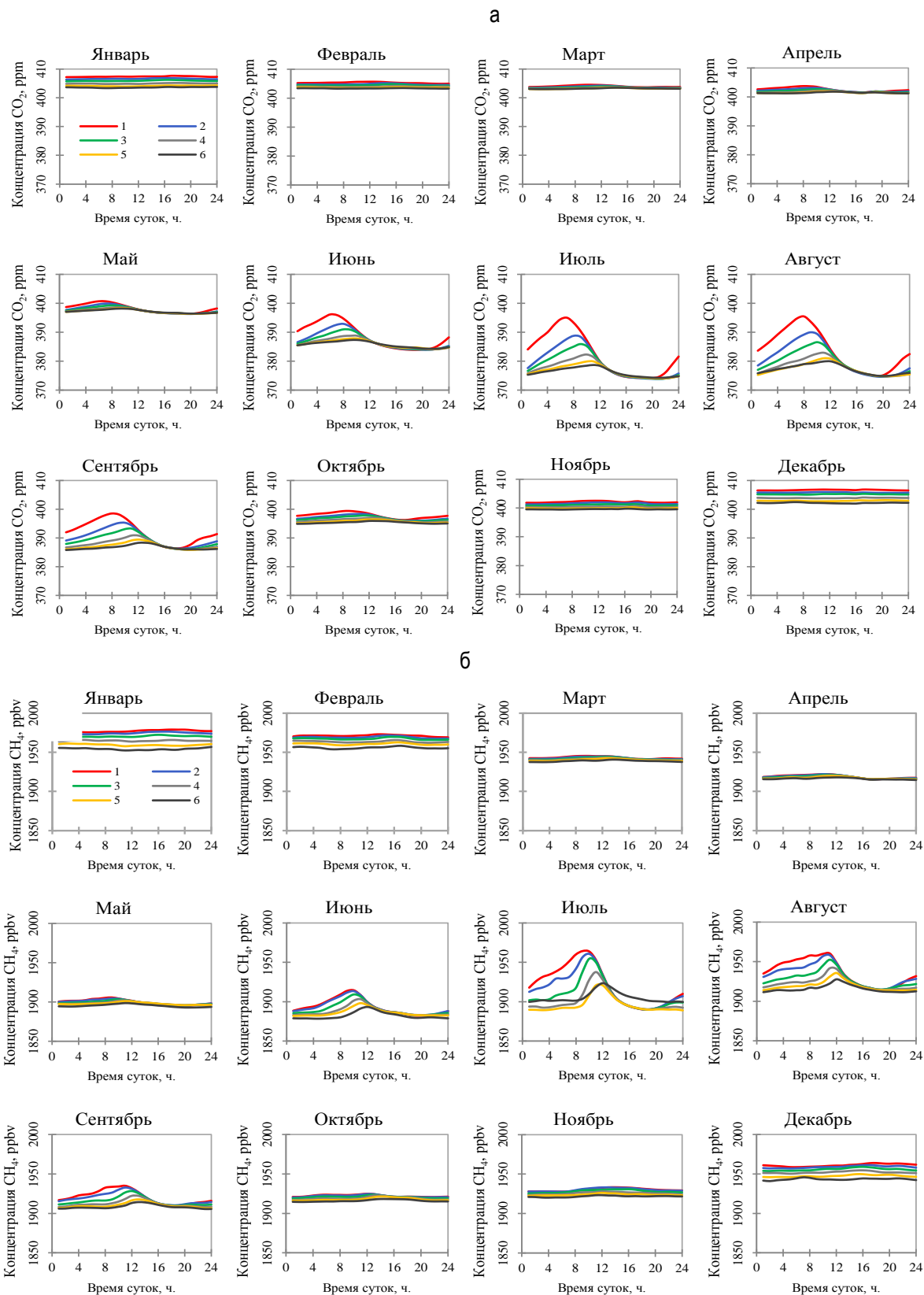


Рис. 1. Динамика суточной концентрации CO_2 (а) и CH_4 (б) в атмосфере на разных высотах (обсерватория «ЗОТТО») в отдельные месяцы года для пятилетнего периода измерений (май 2009 г. – май 2014 г.): 1 – 6 – высота измерительного уровня в градах 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м соответственно

Изменение концентрации CO_2 в течение суток в теплое время года определяется главным образом газообменом диоксида углерода между экосистемами и атмосферой, а именно процессами фотосинтеза (поглощение) и дыхания (выделение) [7]. Интенсивность эмиссий метана из болотных экосистем на протяжении суток примерно одинакова либо может незначительно возрасти в дневное время в летний период [9]. Также существенное влияние на формирование суточного хода концентрации исследуемых газов оказывает 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 [4]. В связи с этим концентрация CO_2 и CH_4 постепенно нарастает внутри слоя. Суточный максимум атмосферной концентрации CO_2 регистрируется в 6:00–7:00 ч местного времени, тогда как пик концентрации CH_4 приходится на период 7:00–10:00 ч. Смещение утренних пиков в содержании исследуемых газов объясняется тем фактом, что фотосинтез (поглощение CO_2) запускается до того, как начинается перемешивание ПСА [12]. 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 [8]. Минимум концентраций фиксировался в вечерние часы (16:00–19:00 ч). На верхней высоте измерений (301 м) суточные колебания концентраций CO_2 и CH_4 в течение всего года выражены относительно слабо, что свидетельствует об ослаблении сигнала биогеоценозов подстилающей поверхности с высотой измерений. 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.

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 (рис. 2, а). 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 достигается 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 $367,3 \pm 1,5$ ppm в 2009 г. до $382,4 \pm 2,4$ ppm в 2013 г. Начиная с августа, несмотря на продолжающуюся фотоассимиляцию CO_2 растительным покровом, наблюдается нарастание его концентрации в атмосфере, что свидетельствует о превышении поглощения респирационным потоком в этот период. Накопление CO_2 в атмосфере происходит вплоть до марта. Тем не менее пиковых концентраций CO_2 , по данным обсерватории «ZOTTO», достигает в декабре–январе. Подобно летним концентрациям мы наблюдаем ежегодный рост CO_2 и в зимний период: от $397,2 \pm 2,7$ ppm в 2010 г. до $407,6 \pm 2,7$ ppm в 2014 г. Сравнительный анализ прироста концентраций CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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 г. до 25,2 ppm в 2013 г., составляя в среднем 28,2 ppm. Полученные результаты согласуются с ранее приведенными оценками (22–28 ppm) [8, 14]. Близкие величины годовой амплитуды концентрации CO_2 (24–30 ppm) для территории Западной Сибири показаны в работе, обобщающей данные сети мониторинга ПГ «JR-STATION» [1]. В отличие от поведения годового цикла атмосферного CO_2 , концентрации CH_4 в атмосфере в районе обсерватории «ZOTTO» имеют два ярко выраженных максимума – в летний (август) и зимний (январь – февраль) периоды (рис. 2, б).

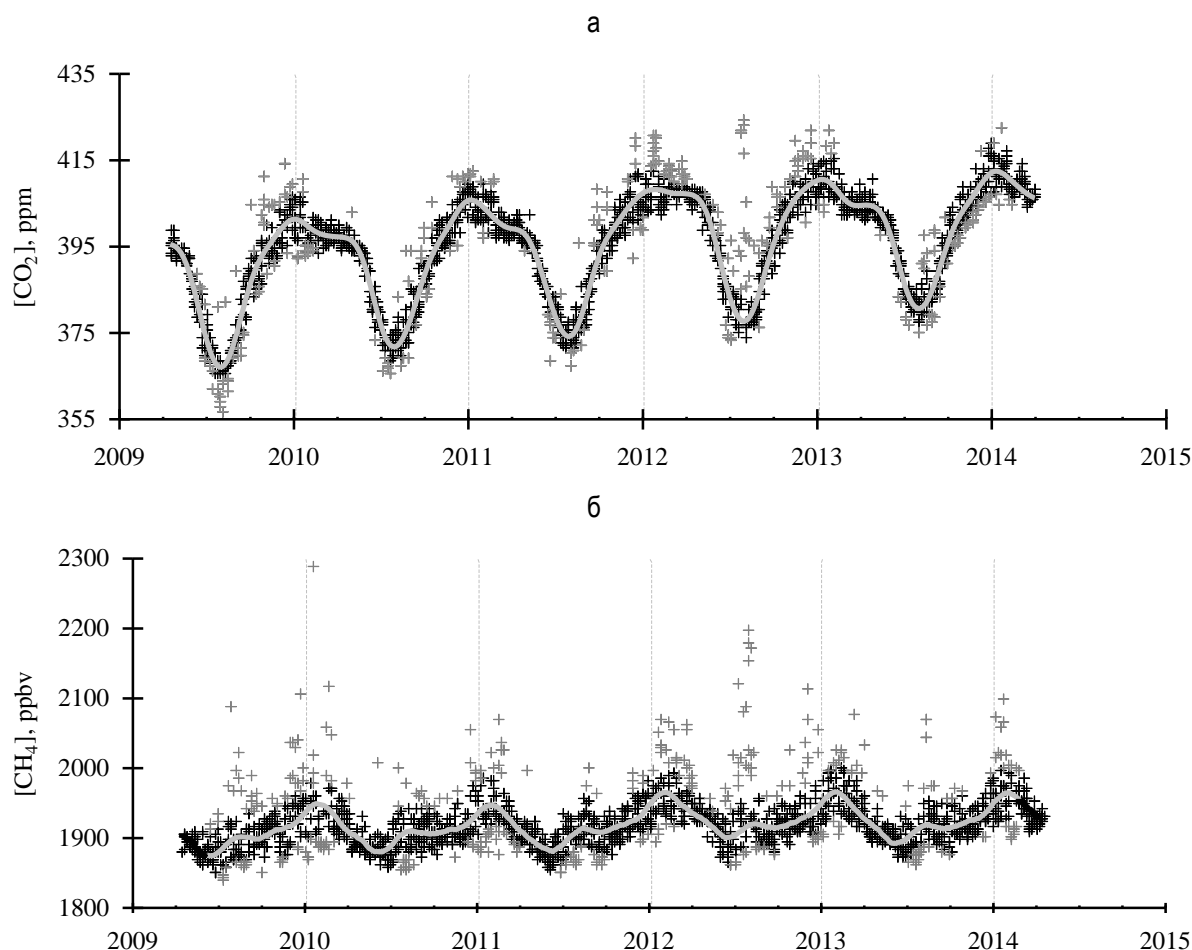


Рис. 2. Динамика дневных концентраций атмосферного CO_2 (а) и CH_4 (б) на обсерватории «ZOTTO» за период измерений (май 2009 – май 2014). Черными крестиками обозначены дневные средние (13:00–17:00 ч) концентрации, серыми крестиками – дневные средние концентрации, лежащие за пределами 2σ , серая кривая – выровненная суточная динамика

Возрастание концентрации CH_4 в летний период фиксируется с середины июня, когда температура почвы увеличивается и способствует нарастанию активности метаногенных микроорганизмов, а достигает своего пика в августе, отражая сезонный максимум эмиссий CH_4 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 CO_2 в зимний период, в содержании атмосферного CH_4 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 CH_4 в районе обсерватории «ZOTTO» хорошо согласуется с ранее показанным для различных постов Западной Сибири, где также прослеживаются два максимума – в летний и зимний периоды. Тогда как время наступления летнего минимума в концентрации CH_4 в некоторых районах Западной Сибири может регистрироваться раньше – в мае, как, например, на посту «Демьянское». При этом сравнительный анализ среднемесячных значений содержания метана в атмосфере средне-таежной подзоны с другими районами Сибири (широтный диапазон от 58 до 63°) [12] выявил общую тенденцию к его снижению в восточном направлении от 65 до 130° в.д. 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 к р. Енисей.

Выводы. В результате проведенной нами работы установлено, что в теплое время года концентрация как CO_2 , так и CH_4 имеет выраженную суточную динамику. Ее амплитуда максимальна на высоте 4 м (около поверхности земли) и практически отсутствует на высоте 301 м. Для обоих исследуемых газов пока-

зано формирование вертикального градиента в концентрациях ночью и его отсутствие днем как следствие суточной динамики функционирования лесных биогеоценозов и состояния пограничного слоя атмосферы. Показано, что в среднетаежной подзоне Сибири концентрация CH_4 имеет два годовых пика – в зимнее (январь–февраль) и летнее (август) время. Максимальные концентрации CO_2 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 $397,2 \pm 2,7$ ppb в 2010 г. до $407,6 \pm 2,7$ ppb в 2014 г. Летние концентрации исследуемых газов возросли с $367,3 \pm 1,5$ ppb в 2009 г. до $382,4 \pm 2,4$ ppb в 2013 г. для CO_2 и с 1900 ± 45 ppb в 2009 г. до 1941 ± 52 ppb в 2013 г. для CH_4 .

Литература

1. Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере / М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Д.К. Давыдов [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т.22. – № 12. – С.1051–1061.
2. Карпенко Л.В., Прокушкин А.С., Корец М.А. Территориальные особенности болот северной части сымдубческого междуречья (Красноярский край) // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 9. – С. 103–111.
3. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2012 год. – М.: Росгидромет, 2013. – 178 с.
4. Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program / P.S. Bakwin, P.P. Tans, D.F. Hurst [et al.] // Tellus. – 1998. – № 50B. – P. 401–415.
5. Atmospheric methane levels off: temporary pause or a new steady-state? / E.J. Dlugokencky, S. Houweling, L. Bruhwiler [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2003. – Vol. 30. – Issue 19.
6. Keeling C.D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere // Tellus. – 1960. – Vol. 12. – Issues 2. – P. 200–203.
7. Seasonal and annual variations in the photosynthetic productivity and carbon balance of a central Siberian pine forest / J. Lloyd, O. Shibistova, D. Zolotoukhine [et al.] // Tellus. – 2002. – № 54 B. – P. 590–610.
8. A trace-gas climatology above Zotino, central Siberia / J. Lloyd, R.L. Langenfelds, R.J. Francey [et al.] // Tellus. – 2002. – № 54B. – P. 749–767.
9. 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.
10. Rapid growth in CO_2 emissions after the 2008–2009 global financial crisis / G.P. Peters, G. Marland, Le Quere [et al.] // Nature Climate Change. – 2012. – Issues 2. – P. 2–4.
11. Renewed growth of atmospheric methane / M. Rigby, R.G. Prinn, P.J. Fraser [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2008. – Issue 35.
12. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia / M. Sasakawa, K. Shimoyama, T. Machida [et al.] // Tellus. – 2010. – Vol. 62B. – P. 403–416.
13. Thoning K.T., Tans P., Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa observatory 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985 // Journal of geophysical research. – 1989. – № D6. – Vol. 94. – P. 8549–8565.
14. Winderlich J. Setup of a CO_2 and CH_4 measurement system in Central Siberia and modeling of its results. // Technical report № 26. – Hamburg, 2011. – P.120.

