

УДК 551.510.41

ВАРИАЦИИ СРЕДНЕГО ПО ВЫСОТЕ ОТНОШЕНИЯ СМЕСИ CO₂ ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2013 г. А. В. Ракитин*, А. В. Поберовский*, Ю. М. Тимофеев*, М. В. Макарова*, Т. Конвей**

*Санкт-Петербургский государственный университет
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1
E-mail: tim@troll.spbu.ru

**Национальное управление океанических и атмосферных исследований,
Научно-исследовательская лаборатория системы Земли, Отдел глобального мониторинга
Боулдер, Бродвей, 325, СО 80305-3337

Поступила в редакцию 30.11.2011 г., после доработки 24.02.2012 г.

Приведены результаты наземных спектроскопических измерений средних по высоте отношений смеси (ОС) CO₂ в районе Санкт-Петербурга за период апрель 2009–октябрь 2011 гг. (~900 измерений, 151 день измерений). Данные измерений показали наличие значительных вариаций ОС CO₂ вблизи Санкт-Петербурга. Минимальное значение ОС, равное 373.1 ppm, наблюдалось 27.04.2011 г., максимальное (420.8 ppm) – 10.02.2010 г. В 2009 г. наблюдался типичный сезонный ход ОС CO₂ с минимумом в летние месяцы. В июле 2010 и 2011 гг. наблюдались повышенные значения ОС CO₂, вероятно, обусловленные высокими температурами. В 2010 г. дополнительный вклад в увеличение ОС CO₂ могли внести мощные природные пожары.

Ключевые слова: состав атмосферы, отношение смеси CO₂, ИК Фурье-спектроскопия.

DOI: 10.7868/S0002351513030127

ВВЕДЕНИЕ

Углекислый газ является важнейшим антропогенным парниковым газом, рост содержания которого ответствен примерно за 80% радиационного возмущения в земной атмосфере. Сжигание ископаемого топлива, такого как уголь, нефть и природный газ, а также автомобильный транспорт являются основными причинами эмиссии антропогенного CO₂. С уровня концентрации 280 ppm в прединдустриальную эпоху его среднее отношение смеси (ОС) увеличилось до ~390 ppm в 2011 г. [1]. Годовой рост в 2000–2009 гг. составлял ~2 ppm/год. Отметим, что за последние 40 лет наблюдается увеличение этой скорости роста.

Регулярные измерения содержания CO₂ начались в 1958 г. на станции Мауна-Лоа [2]. В настоящее время регулярные измерения CO₂ проводятся на международных наземных сетях локальных и дистанционных измерений, с помощью самолетов и судов, а также с помощью спутниковых измерений различного типа (приборы надирного зондирования – AIRS, SCIAMACHY, IASI, GOSAT, приборы лимбового зондирования – ATMOS, CRISTA, TES, ACE и т.д.).

Одним из наземных методов измерений общего содержания CO₂ является метод солнечной аб-

сорбционной спектроскопии (спектроскопический метод). Этот метод используется с 1980 г. на научной станции Иссык-Куль учеными России и Киргизии. Подробный анализ результатов этих исследований приведен, например, в работах [3, 4]. В этих работах проанализированы среднесуточные и среднемесячные значения средних по высоте относительных объемных концентраций (отношений смеси), амплитуды сезонных вариаций, долговременные тренды, функции распределения и т.д. Спектроскопические измерения ОС CO₂ проводятся также в Научно-производственное объединение “Тайфун” (Обнинск) [5], проводились в Москве и Звенигороде [6, 7]. Данные о содержании CO₂ над Москвой за 35-летний период приведены в работе [8].

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

С января 2009 г. в СПбГУ на кафедре физики атмосферы физического факультета (в Старом Петергофе, примерно в 35 километрах к юго-западу от центра Санкт-Петербурга; 59.88° N, 29.83° E, 20 м над ур. моря) проводятся наземные измерения ИК-спектров прямого солнечного излучения с помощью спектрального комплекса на основе Фу-

рье-спектрометра высокого спектрального разрешения Bruker IFS-125 HR [9].

Определение общего содержания CO₂ (молек/см²) производилось с использованием программного обеспечения SFIT v3.92, разработанного коллективом авторов [11] для сети станций NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Входной информацией для SFIT v3.92 являются: спектры солнечного излучения; стандартные профили отношения смеси атмосферных газов (модель WACCM [12]), используемые в качестве начального приближения и их априорные вариации; давление и профиль температуры для станции наблюдений (данные радиозондирования, проводимого Главной геофизической обсерваторией в поселке Воейково, около 50 км от Старого Петергофа) [13]. Априорные относительные вариации отношения смеси CO₂ задавались в нижней тропосфере в 5%, а выше – 3%.

На основе анализа данных атласа [10] и численного анализа погрешностей решения обратной задачи для определения общего содержания CO₂ был выбран спектральный интервал 2626.3–2627.0 см⁻¹. В качестве источника информации о параметрах тонкой структуры линий молекулярного поглощения использовалась спектроскопическая база данных HITRAN 2004 [14]. На рис. 1 представлено сравнение измеренного (12 мая 2010 г.) и рассчитанного (SFIT v3.92) спектров прямого солнечного излучения в интервале 2626.3–2627.0 см⁻¹, а также разница между этими спектрами. Как правило, разности между измеренными и рассчитанными спектрами не превышали 0.2–0.4%, что согласуется со значениями отношения сигнал/шум, составляющими 160–550 для измеряемой спектральной области. Одновременно с общим содержанием CO₂ определялись также содержания CH₄ и HDO (их спектральные линии также присутствуют в выбранном интервале). Случайные погрешности единичного измерения содержания CO₂, полученные на основе расчетов матрицы ошибок метода оптимального оценивания (реализованного в SFIT v3.92), не превышали 1% (~4 ppm). При переходе от значений общего содержания CO₂ к средним по высоте отношениям смеси CO₂ использовались данные радиозондирования.

Измерения ИК-спектров прямого солнечного излучения проводились при ясном небе или в разрывах облачности, достаточных для регистрации интерферограммы. Всего в период с апреля 2009 по октябрь 2011 гг. было получено около 900 спектров. В течение дня обычно регистрировалось несколько (как правило, не более 4) серий спектров, временной промежуток между сериями обычно составлял 1.5–2 часа. При этом одна серия вклю-

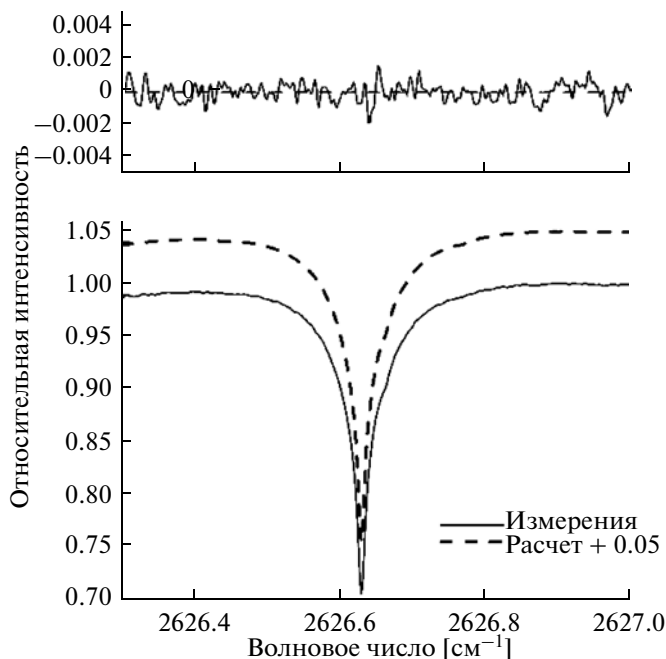


Рис. 1. Сравнения измеренных и рассчитанных (после решения обратной задачи) спектров солнечного излучения в спектральном интервале 2626.3–2627.0 см⁻¹. Вверху – разность спектров.

чает в себя три спектра, каждый из которых получен по 10 интерферограммам. Стабильность значений ОС CO₂, получаемых для различных серий, а также внутри одной серии, служили критерием стабильности работы аппаратуры и состояния атмосферы в течение дня. На этом этапе из анализа были исключены серии и отдельные дни измерений с большими вариациями ОС CO₂ (более 2.5%), которые предполагается анализировать в дальнейшем с привлечением дополнительной информации. В условиях стабильного состояния атмосферы вариации отношения смеси CO₂ в сериях и в течение дня, как правило, не превышали 1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И АНАЛИЗ

Данные по ОС углекислого газа включают в себя 151 день измерений, из которых на 2009 г. приходится 45 дней, на 2010 – 42 дня и на 2011 – 64 дня. На рис. 2 для всего периода измерений представлены среднедневные значения ОС CO₂ и их погрешности, которые также являются характеристикой изменчивости CO₂ в течение дня. Так, для всего анализируемого ряда относительные значения дневной изменчивости менялись от 0.1 до 2.2%, при среднем значении 0.7%.

2009 год. Максимальные значения наблюдались в апреле (400.7–401.6 ppm) и мае (398.6 ppm), а с середины мая началось их падение. Относительно низкие значения ОС наблюдались с конца

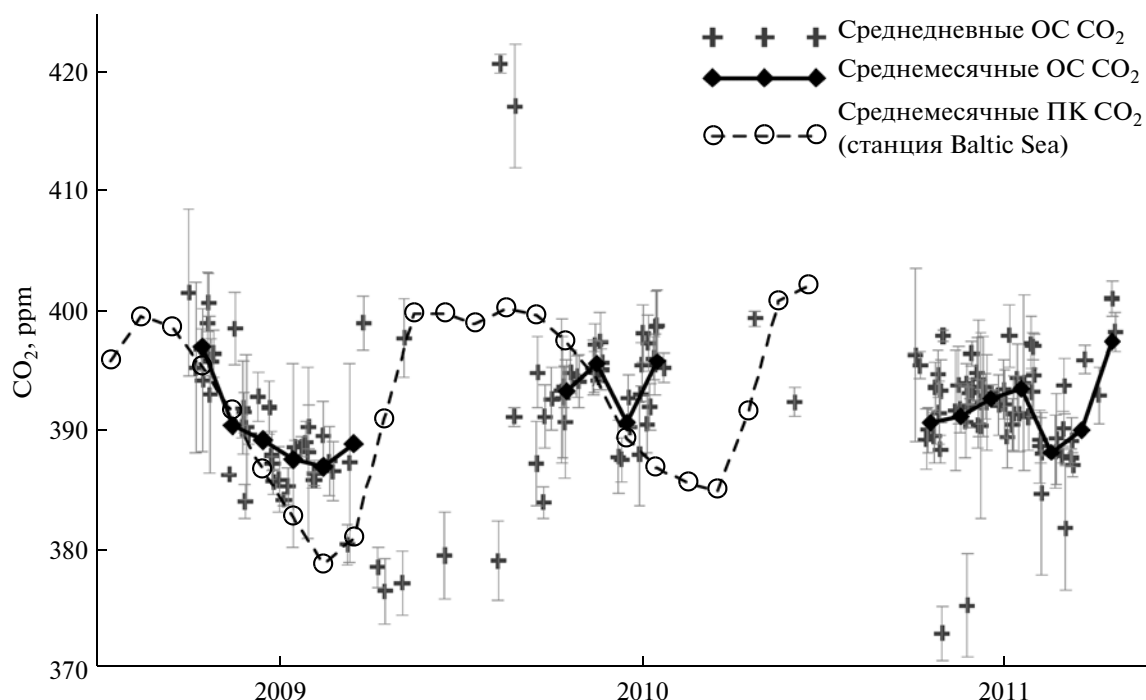


Рис. 2. Среднедневные значения ОС CO_2 вблизи Санкт-Петербурга, сравнение среднемесячных значений ОС CO_2 вблизи Санкт-Петербурга и ПК CO_2 для станции NOAA/ESRL Baltic Sea.

мая до начала ноября – в диапазоне значений 376.6–384.1 ppm. Выявлены значительные вариации в сентябре–ноябре 2009 г. с минимальными значениями ~376–378 ppm.

2010 год. В феврале 2010 г. наблюдались экстремально высокие значения ОС CO_2 (~417–420 ppm) в сочетании с большими вариациями, достигавшими 40 ppm (причины таких изменений будут исследованы в дальнейшем). Высокие значения ОС CO_2 в диапазоне 394–397 ppm также отмечались в апреле–мае 2010 г. Минимальные значения ОС CO_2 для 2010 г. составили ~387 ppm и были зарегистрированы в июне.

2011 год. В марте–июне 2011 г. наблюдались относительно высокие ОС, достигавшие значений 398.0 ppm. При этом зарегистрированы отдельные резкие падения значения ОС до уровня ~373–375 ppm (27.04.2011 и 05.2011 соответ-

ственно). Только в августе отмечались значения ОС ниже 390.0 ppm с минимумом в 384.8 ppm (05.08.2011).

Анализ сезонных изменений ОС CO_2 . Анализ среднемесячных значений ОС CO_2 целесообразно проводить только для месяцев, когда было не менее трех дней измерений, что обычно имеет место для теплого периода (весна–осень). В таблице приведены среднемесячные значения (с апреля по сентябрь) с указанием вариаций ОС (Δ) и числа измерений в месяц (N). На рис. 2 представлено сравнение среднемесячных значений ОС CO_2 , соответствующих таблице, и приземных концентраций (ПК) CO_2 для станции Baltic Sea (ближайшая к Санкт-Петербургу станция NOAA/ESRL регионального мониторинга приземных концентраций CO_2 ; 55.35° N, 17.22° E, 28 м над ур. моря) [15].

Среднемесячные значения ОС CO_2

Год/месяц	2009	Δ	N	2010	Δ	N	2011	Δ	N
Апрель	397.0	14.6	9	393.4	10.5	9	390.7	6.7	11
Май	390.5	8.2	7	395.7	4.8	7	391.3	8.7	10
Июнь	389.3	3.9	6	390.8	6.2	7	392.8	12.6	13
Июль	387.6	11.3	9	395.9	7.1	9	393.6	11.4	12
Август	387.0	5.0	6	–	–	–	388.3	10.9	10
Сентябрь	389.0	8.8	3	–	–	–	390.1	2.6	4

В 2009 г. по нашим измерениям прослеживается часть сезонного хода ОС CO₂ с характерным для CO₂ уменьшением значений от весны к лету [4, 16]. Разница между максимальными апрельскими и минимальными августовскими значениями составила ~8 ppm и может рассматриваться как приближенная оценка амплитуды сезонного хода для 2009 г. Полученный фрагмент сезонного хода согласуется с результатами аналогичных спектроскопических измерений ОС CO₂ на станции мониторинга “Иссык-Куль” [4]. По данным многолетних наблюдений [4], максимумы и минимумы сезонных вариаций ОС CO₂ в центральной части Евразии обычно наблюдаются в апреле и августе соответственно, а средняя амплитуда составляет (8.0 ± 1.4) ppm.

Сравнение среднемесячных значений ОС CO₂ (полученных в районе Санкт-Петербурга) и ПК CO₂ для станции Baltic Sea (см. рис. 2) показало, что в 2009 г. сезонные изменения на обеих станциях имеют схожий характер. Однако амплитуда сезонного хода для приземных концентраций (также рассчитанная по периоду с апреля по октябрь) примерно в два раза выше (~15 ppm). Полученный результат хорошо согласуется с результатами исследования [16], где проведен подробный сравнительный анализ особенностей временной изменчивости для ОС и приземных концентраций CO₂ в атмосфере. В частности, для широтного пояса Евразии 50°–90° N средние амплитуды сезонного хода составляют 22.6 (ПК) и 8.31(ОС) ppm [16]. Там же [16] отмечается, что годовые экстремумы ОС обычно наблюдаются позднее, чем для ПК, причем эта задержка может быть как несколько дней, так и достигать ~7 недель.

В 2010 г. отсутствие измерений в августе и сентябре не позволило получить характеристики сезонного хода: в нашем распоряжении имеются только данные за четыре месяца с апреля по июль. Наметившийся в июне 2010 г. минимум ОС не подтвердился июльскими измерениями: в июле наблюдались высокие значения ОС в диапазоне 391.0–398.8 ppm. Так, различие среднемесячных значений для июля 2010 и 2009 гг. составило 8.3 ppm. Повышенные значения в июле 2010 г. наблюдались также и в ряду ПК (станция Baltic Sea), однако для них разница с июлем предыдущего года была существенно меньше, чем для ОС, и составила 4.1 ppm.

В 2011 г. минимум среднемесячных значений наблюдался в августе, в сентябре–октябре начался сезонный рост ОС CO₂. В июле (аналогично предыдущему 2010 г.) зарегистрировано превышение среднемесячных значений по сравнению с 2009 г. на 6 ppm. Высокие июльские значения ОС CO₂ в 2010 и 2011 гг. предположительно обусловлены очень жаркой погодой, повлиявшей на циклы фотосинтеза и дыхания растений. Для на-

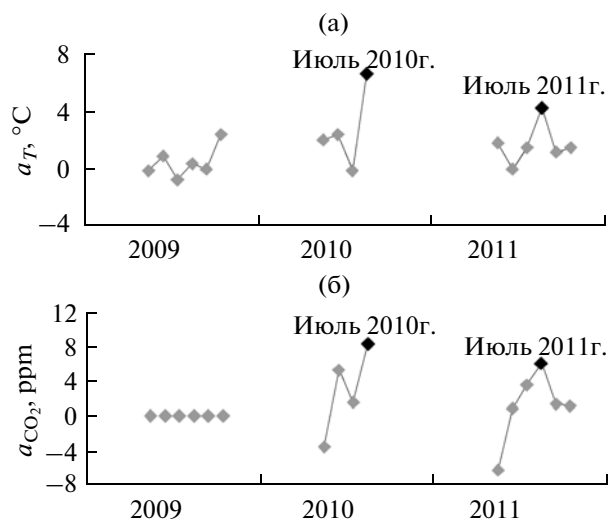


Рис. 3. а – Среднемесячные температурные (a_T) аномалии для Санкт-Петербурга. б – Среднемесячные аномалии ОС CO₂ (a_{CO_2}) для 2010 и 2011 гг.

ших широт при температуре выше оптимальной (20–25°C) интенсивность фотосинтеза резко падает, одновременно возрастает интенсивность дыхания растений, что суммарно приводит к уменьшению поглощения CO₂ из атмосферного воздуха [17]. Действительно, при сравнении среднемесячных “аномалий” ОС CO₂ для теплого периода 2010 и 2011 гг. (a_{CO_2} , рассчитанных относительно 2009 г.) со среднемесячными температурными (a_T) аномалиями для Санкт-Петербурга [18], видно (см. рис. 3б и 3а), что максимумы a_{CO_2} и a_T совпадают и приходятся на июль. Так, июльские значения a_T составили 6.6°C для 2010 г. и 4.3°C для 2011 г. [13]. Отметим, что летом 2009 г. таких температурных аномалий не наблюдалось.

В 2010 г. дополнительный вклад в увеличение ОС CO₂ могли внести мощные природные пожары, сопровождавшиеся выбросом большого количества газов углеродного цикла (CO, CO₂, CH₄ и др.) в атмосферу [19, 20]. Это косвенно подтверждается результатами наших измерений общего содержания угарного газа (измерения проводились одновременно с измерениями ОС CO₂), которые в мае–июле 2010 г. показали превышение над средними многолетними значениями для этого периода на ~10%. Статистические данные, доступные за двадцатилетний период, показывают, что 2010 г. является вторым по объему сгоревшего леса после рекордного 1998 года [21]. Так, в 2009, 2010 и 2011 гг. количество сгоревшего леса на территории России составило 25.4, 93.1 и 28.7 млн. м³ соответственно [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты наземных спектроскопических измерений ОС CO_2 в районе Санкт-Петербурга за период апрель 2009–октябрь 2011 гг. (~ 900 измерений, 151 день измерений). Данные измерений показали наличие значительных вариаций ОС CO_2 вблизи Санкт-Петербурга. Минимальное значение ОС (373.1 ppm) наблюдалось 27.04.2011 г., максимальное (420.8 ppm) – 10.02.2010 г. Подобное поведение ОС CO_2 возможно обусловлено влиянием антропогенных источников CO_2 крупного мегаполиса (например, над Москвой наблюдаются приземные ОС CO_2 , достигающие значений ~800–900 ppm [8, 22]). В 2009 году наблюдался типичный сезонный ход ОС CO_2 с минимумом в летние месяцы. Подобный минимум в 2010 г. почти не проявлялся, а в 2011 г. наметился только в конце августа. В июле 2010 и 2011 гг. наблюдались повышенные значения ОС CO_2 , вероятно, обусловленные высокими температурами, повлиявшими на циклы фотосинтеза и дыхания растений. В 2010 г. дополнительный вклад в увеличение ОС CO_2 могли внести мощные природные пожары.

Анализу физических причин обнаруженных аномалий в содержании CO_2 будет посвящена последующая публикация.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (госконтракты № П969 от 27.05.2010 и № 16.740.11.0048), НИР СПбГУ № 11.31.547.2010 и 11.37.28.2011, РФФИ № 12-05-00596-а на оборудовании РЦ СПбГУ “Геомодель”.

Авторы благодарны Ф.В. Кашину за полезные обсуждения экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Current data for atmospheric CO_2 : <http://co2now.org/Current-CO2/CO2-Now>.
2. Earth System Research Laboratory: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/insitu.html>.
3. Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е. и др. Содержание углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 86–95.
4. Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Семенов В.К. и др. Структура временных вариаций углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии (Станция мониторинга “Иссык-Куль”) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 94–103.
5. Kashin F.V., Baranov Yu.I., Tans P.P. et al. Studies of carbon dioxide, methane and carbon monoxide variations in the air near the ground and in the atmospheric column in the European territory of Russia (Moscow region) // Seventh International Carbon Dioxide Conference, Extended Abstracts, Boulder, Colorado, September 25–30. 2005. P. 269–270.
6. Пугачев Н.С. Спектроскопические измерения содержания углекислого газа во всей толще атмосферы над Москвой // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. № 4. С. 430–432.
7. Пугачев Н.С., Дианов-Клоков В.И., Доронина Т.Н. Измерение спектроскопическим методом содержания CO_2 во всей толще атмосферы над Звенигородом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 7. С. 784–788.
8. Хлыстов А.И., Сомов Б.В. Результаты 35-летних исследований содержания CO_2 в атмосфере Москвы астрофизическим методом // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 2. С. 332–333.
9. Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. №1. С. 56–58.
10. Meier A., Toon G.C., Rinsland C.P. et al. Spectroscopic atlas of atmospheric microwindows in the Middle InfraRed. Kiruna: Sweden IRF Inst. Rymdfysik (Swedish Institute of Space Physics), 2004. 607 p.
11. Rinsland C.P., Nicholas B.J., Connor B.J. et al. Northern and southern hemisphere ground-based infrared spectroscopic measurements of tropospheric carbon monoxide and ethane // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. D21. P. 28197–28218, doi:10.1029/98JD02515.
12. Garcia R.R., Marsh D.R., Kinnison D.E. et al. Simulation of secular trends in the middle atmosphere, 1950–2003 // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D09301. doi:10.1029/2006JD007485.
13. Интернет-ресурс, содержащий данные станций радиозондирования: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
14. The HITRAN molecular spectroscopic database: <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
15. The World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG): <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/index.html>.
16. Olsen S.C., Randerson J.T. Differences between surface and column atmospheric CO_2 and implications for carbon cycle research // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. D02301. doi:10.1029/2003JD003968.
17. Якушкина Н.И. Физиология растений. М.: Владос, 2004. 464 с.
18. Гидрометеорологические обзоры погоды прошедших месяцев и сезонов (Санкт-Петербургский Центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды): <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2>.
19. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б. и др. Газовый состав приземной атмосферы в Москве в экстремальных условиях лета 2010 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 437. № 1. С. 90–96.
20. Фокеева Е.В., Сафронов А.Н., Ракитин В.С. и др. Исследование влияния пожаров в июле–августе 2010 года на загрязнение окисью углерода атмосферы Москвы и окрестностей, оценка эмиссий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 1–18.
21. Данные о лесных пожарах по Российской Федерации (Федеральная служба государственной статистики): http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/sx/les2.htm.
22. Квашин И.М., Гурин И.И. К вопросу о нормировании воздухообмена по содержанию CO_2 в наружном и внутреннем воздухе (http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4046).

Variations in the Height-Averaged CO₂ Mixing Ratio in the Vicinity of St. Petersburg

A. V. Rakitin^a, A. V. Poberovskii^a, Yu. M. Timofeev^a, M. V. Makarova^a, and T. J. Conway^b

^a St. Petersburg State University, ul. Ul'yanovskaya 1, Petrodvorets, 198504 Russia

e-mail: tim@troll.spbu.ru

^b National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 325 Broadway, Boulder, CO, 80305-3337 USA

Received November 30, 2011; in final form, February 24, 2012

Abstract—The results obtained from ground-based spectroscopic measurements of height-averaged CO₂ mixing ratios in the atmosphere over the St. Petersburg region are given for the period April 2009–October 2011 (~900 measurement runs, 151 measurement days). These results show significant variations in the CO₂ mixing ratio in the atmosphere over the St. Petersburg region. The minimum value of this mixing ratio (373.1 ppm) was observed on April 27, 2011, and its maximum value (420.8 ppm) was observed on February 10, 2010. The typical seasonal behavior of the CO₂ mixing ratio with its summer minimum was observed in 2009. In July 2010 and 2011, the values of the CO₂ mixing ratio increased apparently due to high air temperatures. In 2010 an additional contribution to this increase in the CO₂ mixing ratio could have been made by strong natural fires.

Keywords: atmospheric composition, CO₂ mixing ratio, Fourier transform infrared spectroscopy.