

## СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ (GOSAT) И НАЗЕМНЫХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ CO<sub>2</sub> ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2013 г. Н. М. Гаврилов\*, Ю. М. Тимофеев

Санкт-Петербургский государственный университет

\*E-mail: gavrilov@pobox.spbu.ru

Поступила в редакцию 24.11.2012 г.

Выполнено сравнение средних по столбу атмосферы отношений смеси углекислого газа, измеренных методом наземной Фурье-спектроскопии на Петергофской базе Санкт-Петербургского государственного университета (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) в 2009–2011 гг., с аналогичными данными, полученными японским спутником GOSAT. Сравнение показывает, что средние значения отношений смеси CO<sub>2</sub> по спутниковым данным версии V01.xx на  $-9.8 \pm 3$  млн<sup>-1</sup> меньше, чем соответствующие значения, полученные из наземных измерений. Для версии данных GOSAT V02.xx занижение в среднем составляет  $-4.7 \pm 2.6$  млн<sup>-1</sup>. Косвенно обнаружено некоторое завышение значений  $X_{CO_2}$ , измеряемых в районе Санкт-Петербурга по сравнению с данными сети наземных станций TCCON, причины которого требуют дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** углекислый газ, полное содержание, наземные измерения, Фурье-спектроскопия, спутник GOSAT, сравнение, валидация

DOI: 10.7868/S0205961413040040

### ВВЕДЕНИЕ

Для лучшего понимания особенностей глобальных циклов углерода и их влияния на изменение климата необходимы регулярные измерения атмосферного CO<sub>2</sub>. До недавнего времени большинство станций мониторинга CO<sub>2</sub> использовало метод забора и химического анализа проб воздуха для определения отношения смеси CO<sub>2</sub> вблизи поверхности земли (Convey et al., 2003) или в тропосфере с использованием самолетов. На станциях наблюдения, расположенных на удалении от активных источников и стоков CO<sub>2</sub>, могут применяться оптические спектрометрические методы определения общего содержания CO<sub>2</sub> в столбе атмосферы. Эти методы используют регистрацию поглощения солнечной радиации в ИК-части спектра и измеряют среднее по столбу атмосферы отношение смеси CO<sub>2</sub>,  $X_{CO_2}$ . В России этот метод используется с 1980 г. на научной станции Иссык-Куль учеными России и Киргизии. Подробный анализ результатов этих исследований приведен в работах (Кашин и др. 2007, 2008). В последние годы для наземных измерений содержания CO<sub>2</sub> в столбе атмосферы регулярно применяется Фурье-спектроскопия высокого разрешения (Yang et al., 2002; Deutscher et al., 2010). С января 2009 г. на кафедре физики атмосферы Санкт-Петербургского

государственного университета (СПбГУ) в Старом Петергофе (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) проводятся наземные измерения спектров прямого солнечного излучения в ИК-области с помощью Фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения Bruker IFS-125HR (Поберовский, 2010).

Данные наземных оптических измерений CO<sub>2</sub> также могут быть полезны для валидации спутниковых измерений, которые дают информацию об общем содержании CO<sub>2</sub> в столбе атмосферы. Начиная с 2002 г., были проведены демонстрационные измерения содержания CO<sub>2</sub> в столбе атмосферы с помощью прибора SCIAMACHY на спутнике ENVISAT (Barkley et al., 2006a, 2006b). В 2004 г. был запущен спутник EOS Aqua с прибором AIRS, который также позволяет определять содержания CO<sub>2</sub> в столбе атмосферы. Разработана международная программа запуска других приборов для глобального мониторинга пространственно-временных вариаций содержания CO<sub>2</sub> в столбе атмосферы. Для валидации спутниковых наблюдений парниковых газов создана специальная сеть наблюдения общего содержания CO<sub>2</sub> (the Total Carbon Column Observation Network, TCCON), использующая наземную Фурье-спектроскопию прямого солнечного излучения для проведения регулярных измерений общих содержаний CO<sub>2</sub> и

других климатообразующих газов (Wunch et al., 2011).

В январе 2009 г. был запущен спутник для наблюдения парниковых газов (Greenhouse gases Observing SATellite, GOSAT), который является совместным проектом Японского аэрокосмического агентства и Института исследований окружающей среды в Кукубе, Япония (Kuze et al., 2009). Спутник предназначен для наблюдения глобальных распределений общих содержаний  $\text{CO}_2$  и метана ( $\text{CH}_4$ ) из космоса. Средние по столбу атмосферы отношения смеси  $X_{\text{CO}_2}$  и  $X_{\text{CH}_4}$  восстанавливаются из данных наблюдений прибором TANSO-FTS (Thermal And Nearinfrared Sensor for carbon Observation Fourier Transform Spectrometer), который является Фурье-спектрометром, ориентированным на исследование углеродсодержащих газов в ИК-области спектра с борта спутника GOSAT (Yoshida et al., 2011). В работе (Morino et al., 2011) выполнены предварительная валидация значений  $X_{\text{CO}_2}$ , измеряемых спутником GOSAT, и их сравнение с данными измерений Фурье-спектрометрами на наземной сети TCCON.

В нашей статье выполнено сравнение измерений  $X_{\text{CO}_2}$  с борта спутника GOSAT с данными Фурье-спектроскопических наблюдений с земной поверхности вблизи Санкт-Петербурга в 2009–2011 гг.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Ракитин и др. (2012) представили результаты определения средних по высоте отношений смеси  $\text{CO}_2$ ,  $X_{\text{CO}_2}$  из измеренных Фурье-спектрометром высокого спектрального разрешения Bruker IFS-125HR (Поберовский, 2010) ИК-спектров для периода с апреля 2009 г. по октябрь 2011 г. на базе СПбГУ в Старом Петергофе (примерно в 35 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга). Для определения  $X_{\text{CO}_2}$  использовались спектральный интервал  $2626.3\text{--}2627.0\text{ см}^{-1}$  и международная программа интерпретации SFIT V3.92, разработанная коллективом авторов (Rinsland et al., 1998) для сети станций NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Входной информацией для SFIT V3.92 являются спектры солнечного излучения, начальные профили отношения смеси  $\text{CO}_2$  и второстепенных газов и их априорные вариации. Априорные относительные вариации отношений смеси  $\text{CO}_2$  задавались в нижней тропосфере в 5%, а выше – 3%. На выходе программы выдаются оценки общего содержания  $\text{CO}_2$  (в  $\text{мол}/\text{см}^2$ ) и случайные погрешности их определения. При определении средних по высоте отношений смеси  $\text{CO}_2$  использовались ежедневные данные радиозондирования атмосферы на станции п. Воей-

ково. В качестве источника информации о параметрах тонкой структуры линий молекулярного поглощения использовалась спектроскопическая база данных HITRAN (2004).

При восстановлении общего содержания  $\text{CO}_2$  в качестве “мешающих” параметров определялось содержание  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Случайные погрешности единичного измерения содержания  $\text{CO}_2$  не превышали 1% ( $\sim 4\text{ млн}^{-1}$ ) по оценкам с помощью расчетов матрицы ошибок метода оптимального оценивания (реализованного в SFIT). В условиях стабильной работы аппаратуры и стабильного состояния атмосферы вариации отношения смеси  $\text{CO}_2$  в сериях и в течение дня, как правило, не превышали 1%. Приведенные в работе (Ракитин и др., 2012) значения отношения смеси  $X_{\text{CO}_2}$  были получены по отношению к полному числу молекул (вместе с водяным паром). В связи с тем, что данные  $X_{\text{CO}_2}$ , полученные со спутника GOSAT, относятся к сухой атмосфере (без вклада водяного пара), в настоящем исследовании данные Ракитина и др. (2012) были скорректированы к сухой атмосфере с использованием результатов реанализа метеорологических данных из Европейского центра ECMWF (Dee et al., 2011) для моментов времени и координат пункта наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга.

Результаты спутниковых измерений среднего по столбу атмосферы  $X_{\text{CO}_2}$  доступны на веб-сайте проекта GOSAT Национального института исследований окружающей среды Японии (NIES, 2010). Для пользователей доступны две версии данных GOSAT: V01.xx и V02.xx, которые различаются методикой анализа спектров, измеряемых прибором TANSO-FTS. Метод анализа спектров для версии данных V01.xx подробно описан в работе (Yoshida et al., 2011). Для одновременного определения общих содержаний молекул  $N_{\text{CO}_2}$ ,  $N_{\text{CH}_4}$  и  $N_{\text{O}_2}$  в столбе атмосферы используются полосы поглощения в ИК-области солнечного спектра  $6180\text{--}6380$ ,  $5900\text{--}6150$  и  $12950\text{--}13200\text{ см}^{-1}$  соответственно. Измеренные спектры анализируются с использованием алгоритма GFIT (Toon et al., 1992; Wunch et al., 2011), который также используется на всех станциях наземной сети Фурье-спектрометров TCCON (Wunch et al., 2011). Из всех измерений прибором TANSO-FTS отбираются только спектры, на измерение которых не влияла облачность. Последняя контролируется прибором TANSO-CAI, измеряющим излучения в видимой, УФ- и БИК-областях спектра.

Случайные ошибки измерения  $X_{\text{CO}_2}$  оцениваются в среднем в  $2\text{ млн}^{-1}$ , или около 0.5%, и определяются шумом прибора (основной источник ошибки), ошибками усреднения и влияния второстепенных газов (Yoshida et al., 2011). Внутри

указанных версий обработки данных спутника GOSAT выделяются подверсии, например V01.10, V01.20, V01.30, которые отличаются алгоритмами первичной обработки измеряемых Фурье-спектров (критериями определения насыщения и выбросов спектров – см. (Yoshida et al., 2011; Kuze et al., 2012). В последнее время появилась версия данных GOSAT V02.xx (с подверсиями V02.00, V02.11), которая отличается улучшенными алгоритмами первичной обработки и анализа спектров, учета облачности и аэрозольной дымки, а также усовершенствованной моделью учета метеорологической информации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ

Для сравнения  $X_{CO_2}$ , измеренных в районе Санкт-Петербурга с земной поверхности и с борта спутника GOSAT, были выбраны интервалы одновременных измерений в 2009–2011 гг. Для этих интервалов из базы данных Института исследований окружающей среды в Цукубе, Япония (NIES, 2012), были выбраны случаи измерения  $X_{CO_2}$  спутником GOSAT в окрестностях  $\pm 3^\circ$  по широте и долготе от пункта наземных измерений. В табл. 1 перечислены временные интервалы, версии программ анализа данных и количество измерений спутником GOSAT, отобранных для анализа. Из данных наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга для сравнения были отобраны измерения, проводившиеся в интервалы 12–15 ч локального солнечного времени, когда Солнце находилось максимально высоко над горизонтом. Также были использованы только значения, попадающие в 95%-ный доверительный интервал около среднего значения для соответствующего периода наблюдений. Данные наземных наблюдений содержания  $CO_2$  в столбе влажной атмосферы были приведены к значениям  $X_{CO_2}$  для сухого воздуха.

На рис. 1 представлены индивидуальные значения  $X_{CO_2}$  по наземным и спутниковым измерениям, перечисленным в табл. 1. Во многих случаях даты измерений двумя методами не совпадают. Однако из рис. 1 видны систематически меньшие значения  $X_{CO_2}$ , измеренные со спутника GOSAT, по сравнению с измерениями с земной поверхности, причем значения версий данных V01.xx и V02.xx меньше наземных значений в среднем на  $10 \text{ млн}^{-1}$  и  $5 \text{ млн}^{-1}$  соответственно.

В табл. 2 приведены значения отношений смеси  $CO_2$ , измеренных с земной поверхности,  $X_{CO_2\_SPB}$ , и со спутника GOSAT,  $X_{CO_2\_GOS}$  (версии данных V01.xx), а также разностей  $\Delta X_{CO_2} = X_{CO_2\_GOS} - X_{CO_2\_SPB}$  для совпадающих дат наземных и спутниковых измерений в течение ука-

**Таблица 1.** Временные интервалы и версии данных GOSAT, использованные для сравнения

Период	Версия	Число
08.04.2009–25.06.2009	V01.10	4
02.08.2009–20.09.2009	V01.20	4
12.04.2010–09.09.2010	V01.30	8
25.04.2010–12.09.2011	V01.50	7
06.06.2009–21.09.2009	V02.00	16
12.04.2010–31.07.2010	V02.00	28
03.07.2011–30.07.2011	V02.11	3

**Таблица 2.** Среднедневные значения отношений смеси  $CO_2$  для совпадающих дат наземных измерений в районе Санкт-Петербурга и измерений (версия данных V01.xx) со спутника GOSAT

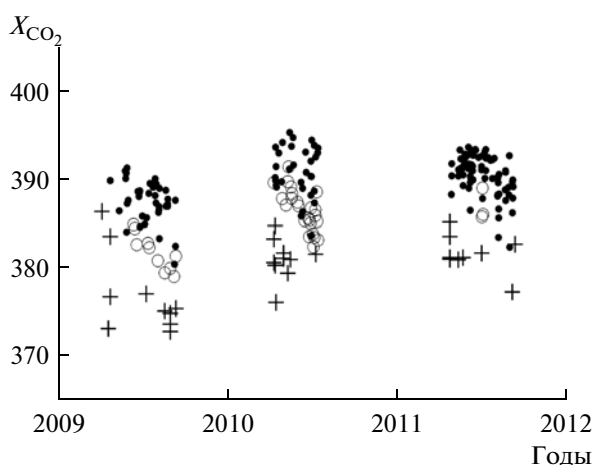
Дата	$X_{CO_2\_SPB}$ , млн <sup>-1</sup>	$X_{CO_2\_GOS}$ , млн <sup>-1</sup>	$\Delta X_{CO_2}$ , млн <sup>-1</sup>
25.06.2009	389.4	380.1	–9.3
21.08.2009	388.8	375.1	–13.7
12.04.2010	393.2	382.8	–10.4
26.04.2010	390.7	381.6	–9.2
12.05.2010	392.2	380.2	–12.0
21.05.2010	394.7	387.7	–7.0
25.04.2011	389.3	384.2	–5.2
28.04.2011	398.5	386.9	–11.6
10.05.2011	392.0	387.3	–4.7
13.05.2011	394.4	381.8	–12.6
06.09.2011	388.4	378.1	–10.4
среднее	392.0	382.3	–9.6
медиана	392.0	381.8	–10.4
дисперсия	3.1	4.0	3.0

занных в табл. 1 периодов наблюдений в 2009–2010 гг. В табл. 3 приведены данные, аналогичные табл. 2, но для версии данных GOSAT V02.xx. В тех случаях, когда в течение дня регистрировалось несколько наземных или спутниковых значений  $X_{CO_2}$ , в табл. 2 и 3 использованы усредненные значения. Таблицы 2 и 3 показывают, что почти во всех рассмотренных случаях  $X_{CO_2}$ , измеренные с земной поверхности, больше соответствующих спутниковых значений. Средние и медианные значения  $\Delta X_{CO_2}$  в табл. 3 для версии данных V02.xx существенно меньше, чем соответствующие значения в табл. 2 для версии данных V01.xx. Это соответствует более низкому расположению крестиков по сравнению с кружками на рис. 1.

**Таблица 3.** Среднедневные значения отношений смеси  $\text{CO}_2$  для совпадающих дат наземных измерений в районе Санкт-Петербурга и измерений (версия данных V02.xx) со спутника GOSAT

Дата	$X_{\text{CO}_2\_SPB}$ , млн <sup>-1</sup>	$X_{\text{CO}_2\_GOS}$ , млн <sup>-1</sup>	$\Delta X_{\text{CO}_2}$ , млн <sup>-1</sup>
22.06.2009	389.6	383.5	-6.1
26.06.2009	387.6	384.5	-3.1
01.07.2009	386.8	382.8	-4.0
12.04.2010	393.2	390.7	-2.5
15.04.2010	390.1	391.7	1.5
26.04.2010	390.7	389.3	-1.4
12.05.2010	392.3	388.5	-3.8
14.05.2010	398.8	392.5	-6.3
19.05.2010	396.3	390.2	-6.1
20.05.2010	395.9	388.9	-7.0
21.05.2010	394.7	389.4	-5.3
17.06.2010	394.2	386.3	-7.9
28.06.2010	389.2	386.4	-2.8
05.07.2010	390.7	384.8	-5.9
12.07.2010	394.1	390.4	-3.7
13.07.2010	397.0	389.6	-7.4
26.07.2011	393.5	385.3	-8.2
среднее	392.6	387.9	-4.7
медиана	393.2	388.9	-5.3
дисперсия	3.4	3.0	2.6

Для увеличения объема выборки были проанализированы пары индивидуальных наземных и спутниковых значений  $X_{\text{CO}_2}$ , у которых разности дат измерений не превышали двух суток. На рис. 2



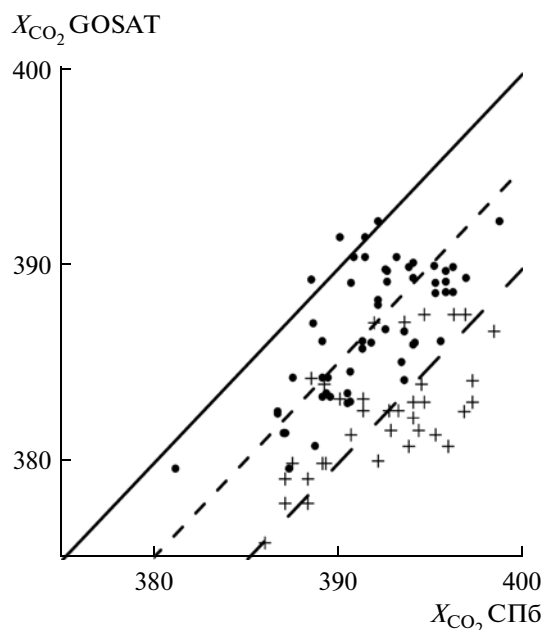
**Рис. 1.** Значения  $X_{\text{CO}_2}$  в млн<sup>-1</sup> по наземным измерениям в районе Санкт-Петербурга (точки) и по данным спутника GOSAT версии V01.xx (крестики) и версии V02.xx (кружки).

изображены соответствующие пары значений  $X_{\text{CO}_2\_SPB}$  и  $X_{\text{CO}_2\_GOS}$  для обеих версий данных спутника GOSAT. Сплошной линией на рис. 2 обозначены значения  $X_{\text{CO}_2\_SPB} = X_{\text{CO}_2\_GOS}$ . Видно, что почти все измеренные значения лежат ниже сплошной линии на рис. 2, т.е.  $X_{\text{CO}_2\_SPB} > X_{\text{CO}_2\_GOS}$ , причем расхождение больше для версии спутниковых данных V01.xx по сравнению с версией V02.xx. Коэффициенты корреляции между  $X_{\text{CO}_2\_SPB}$  и  $X_{\text{CO}_2\_GOS}$  на рис. 2 равны 0.65 и 0.71 для данных GOSAT V01.xx и V02.xx соответственно. Средние значения разностей  $\Delta X_{\text{CO}_2} = X_{\text{CO}_2\_GOS} - X_{\text{CO}_2\_SPB}$  для данных, изображенных на рис. 2, приведены в табл. 4. Линии, изображенные длинным и коротким пунктиром на рис. 2, сдвинуты относительно сплошной линии на средние значения  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  из табл. 4 для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответственно. На рис. 3 показаны гистограммы индивидуальных значений  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  с рис. 2 для обеих версий спутниковых данных. Они имеют максимумы в районах  $-(8-11)$  млн<sup>-1</sup> и  $-(4-6)$  млн<sup>-1</sup> для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx, которые соответствуют указанным в табл. 2-4 средним значениям  $\Delta X_{\text{CO}_2}$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ

Morino et al. (2011) выполнили сравнение данных GOSAT версии V01.xx с результатами Фурье-спектроскопических измерений  $X_{\text{CO}_2}$  в 2009–2010 гг. на девяти станциях наземной сети TCCON, находящихся в широтном поясе от 45° ю.ш. до 53° с.ш. Они обнаружили занижение спутниковых значений  $X_{\text{CO}_2}$  на  $-(7-13)$  млн<sup>-1</sup> для различных станций, при среднем значении расхождения  $\Delta X_{\text{CO}_2} = -8.85 \pm 4.75$  млн<sup>-1</sup>. Аналогичное значение  $-9.08 \pm 5.41$  млн<sup>-1</sup> получили Tanaka et al. (2012) для разности между значениями  $X_{\text{CO}_2}$  версии данных GOSAT V01.xx и средним по высоте отношением смеси  $\text{CO}_2$ , измеренным с самолета. Значения  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  для версии данных GOSAT V01.xx в табл. 2 и 4 в основном попадают в указанный диапазон, причем средние и медианные  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  лежат в пределах  $-(9.6-10.4)$  млн<sup>-1</sup>. Это означает, что значения  $X_{\text{CO}_2}$ , измеряемые с земной поверхности в районе Санкт-Петербурга, могут быть в среднем на 0.8–1.5 млн<sup>-1</sup> завышены относительно средних значений для сети станций TCCON.

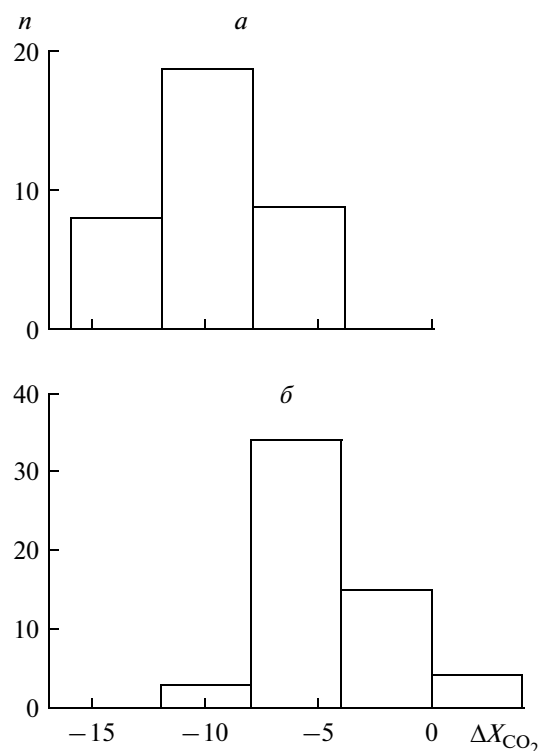
Одной из причин такого завышения могут быть более высокая широта и меньший угол подъема Солнца над горизонтом для наблюдений вблизи Санкт-Петербурга (59.9° с.ш.) по сравнению с TCCON станциями, проанализированными Morino et al. (2011). Анализ наших измерений



**Рис. 2.** Значения  $X_{\text{CO}_2\_SPB}$  и  $X_{\text{CO}_2\_GOS}$  в  $\text{млн}^{-1}$ , разности дат измерений у которых не превышали 2 сут. Сплошная линия – значения  $X_{\text{CO}_2\_SPB} = X_{\text{CO}_2\_GOS}$ , сдвиги длинного и короткого пунктира по вертикали соответствуют средним разностям  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответственно.

$X_{\text{CO}_2}$  в наиболее ясные дни, когда удавалось получить несколько серий измерений в течение дня, показал систематически повышенные значения  $X_{\text{CO}_2}$  в утренние и вечерние часы при низком Солнце по сравнению с серединой дня, когда Солнце поднималось на максимальные углы над горизонтом. Поэтому меньшие углы подъема Солнца над горизонтом могут приводить к некоторому завышению измеряемых значений  $X_{\text{CO}_2}$  в более высоких широтах. Другой причиной расхождения измерений  $X_{\text{CO}_2}$  в районе Санкт-Петербурга может быть другой спектральный диапазон измерений по сравнению с сетью TCCON, что требует дальнейшего анализа. Стоит также упомянуть в качестве возможной причины превышения содержания  $\text{CO}_2$  в наземных измерениях влияние мегаполиса Санкт-Петербурга, являющегося источником антропогенного  $\text{CO}_2$  (Kort et al., 2012).

Дисперсии индивидуальных расхождений  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  между данными GOSAT версии V01.xx и станциями сети TCCON, согласно Morino et al. (2011), для разных станций лежат в пределах 2.8–5.6  $\text{млн}^{-1}$  при среднем значении 4.75  $\text{млн}^{-1}$ . Это несколько больше значений дисперсий, приведенных в табл. 2 и 4 для данных GOSAT версии



**Рис. 3.** Гистограммы значений  $\Delta X_{\text{CO}_2} = X_{\text{CO}_2\_GOS} - X_{\text{CO}_2\_SPB}$  в  $\text{млн}^{-1}$  для пар измерений, представленных на рис. 2 для данных GOSAT: а – версия V01.xx; б – версия V02.xx.

V01.xx. Возможно, это является следствием исключения из нашего анализа значений  $X_{\text{CO}_2}$ , которые имели отклонения более удвоенной дисперсии от средних значений для совпадающих интервалов спутниковых и наземных измерений в разные годы.

Сравнение табл. 2 и 3, а также табл. 4 для разных версий данных GOSAT показывает, что расхождение с наземными измерениями для версии V02.xx примерно на 5  $\text{млн}^{-1}$  меньше, чем для версии V01.xx, и составляет в среднем  $-4.7 \pm 2.6 \text{ млн}^{-1}$ . Имеются публикации (напр., Notholt et al., 2012), в которых упоминаются алгоритмы анализа спутниковых измерений, дающие абсолютные значения расхождений  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  между спутником GOSAT и станциями сети TCCON в 1  $\text{млн}^{-1}$  и менее. По-видимому, в этих публикациях речь идет об исследовательских алгоритмах, которые еще не полностью внедрены в оперативную практику и результаты которых еще недоступны широкому кругу пользователей. Кроме того, указанное отсутствие систематических отличий спутниковых и наземных измерений  $\text{CO}_2$  относится к данным, усредненным за относительно большие интервалы измерений. Анализ данных отчета Notholt et al. (2012) показывает, что на протяжении более ко-

Таблица 4. Средние характеристики для данных, изображенных на рис. 2

Данные	Оценка	$X_{\text{CO}_2\_SPB}$ , млн <sup>-1</sup>	$X_{\text{CO}_2\_GOS}$ , млн <sup>-1</sup>	$\Delta X_{\text{CO}_2}$ , млн <sup>-1</sup>
V01.xx	среднее	392.4	382.4	-10.0
	медиана	392.9	382.8	-10.0
	дисперсия	3.4	3.2	2.8
V02.xx	среднее	391.9	387.1	-4.8
	медиана	392.0	387.1	-5.5
	дисперсия	3.4	3.4	2.6

ротких интервалов (2–4 мес.) могут наблюдаться систематические отличия между наземными и спутниковыми измерениями в 3–6 млн<sup>-1</sup>.

Morigino et al. (2011) показали, что значения  $X_{\text{CO}_2}$ , измеряемые спутником GOSAT обнаруживают сезонное и широтное поведение, аналогичное наблюдаемому на сети наземных станций TCCON. При этом использование версии данных GOSAT V02.xx ведет к меньшим расхождениям между спутниковыми и наземными измерениями.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнено сравнение средних по столбу атмосферы отношений смеси  $\text{CO}_2$ ,  $X_{\text{CO}_2}$ , измеренных методом Фурье-спектроскопии с земной поверхности на Петергофской базе СПбГУ (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) в 2009–2011 гг., с аналогичными данными (версии V01.xx и V02.xx.), полученными японским спутником GOSAT. Средние значения разностей  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  между спутниковыми данными версии V01.xx и измерениями с земной поверхности составляют  $-9.8 \pm 3$  млн<sup>-1</sup>, что согласуется с литературными данными о сравнении данных GOSAT этой версии с сетью наземных станций TCCON и с самолетными измерениями. Среднее расхождение между данными GOSAT версии V02.xx составляет  $-4.7 \pm 2.6$  млн<sup>-1</sup>, т.е. в 2 раза меньше, чем для данных версии V01.xx. Результаты сравнения косвенно показывают некоторое завышение значений  $X_{\text{CO}_2}$ , измеряемых в районе Санкт-Петербурга по сравнению с данными сети наземных станций TCCON, причины которого требуют дальнейшего исследования.

Авторы благодарны А.В. Поберовскому, Р.В. Журавлеву и В.А. Юшкову за полезные обсуждения и помощь в получении информации. Данное исследование выполнено при частичной финансовой поддержке грантов НИР СПбГУ № 11.31.547.2010 и № 11.37.28.2011, а также гранта РФФИ 12-05-00596.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е., Семенов В.К., Синяков В.П. Содержание углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 521–530.
- Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Семенов В.К., Синяков В.П., Упэнэк Л.Б. 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.
- Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 1. С. 56–58.
- Ракутин А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М. Вариации средних по высоте отношений смеси  $\text{CO}_2$  вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. (в печати).
- Barkley M.P., Frieb U., Monks P.S. Measuring atmospheric  $\text{CO}_2$  from space using Full Spectral Initiation (FSI) WFM-DOAS // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2006a. V. 6. P. 2765–2807.
- Barkley M.P., Monks P.S., Frie U., Mittermeier R.L., Fast H., Korner S., Heimann M. Comparisons between SCIAMACHY atmospheric  $\text{CO}_2$  retrieved using (FSI) WFM-DOAS to ground based FTIR data and the TM3 chemistry transport model // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2006b. V. 6. P. 5387–5425.
- Conway T.J., Andrews A.E., Bruhwiler L., Crotwell A., Dlugokencky E.J., Hahn M.P., Hirsch A.I., Kitzis D.R., Lang P.M., Masarie K.A., Michalak A.M., Miller J.B., Novelli P.C., Peters W., Tans P.P., Thoning K.W., Vaughn B.H., Zhao C. Carbon cycle greenhouse gases // CMDL Report. 2003. № 27. P. 32–57. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/publications/annrpt27>.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597. doi: 10.1002/qj.828. <http://data-portal.ecmwf.int>.

- Deutscher N.M., Griffith D.W.T., Bryant G.W., Wennberg P.O., Toon G.C., Washenfelder R.A., Keppel-Aleks G., Wunch D., Yavin Y., Allen N.T., Blavier J.-F., Jimenez R., Daube B.C., Bright A.V., Matross D.M., Wofsy S.C., Park S.* Total column CO<sub>2</sub> measurements at Darwin, Australia – site description and calibration against in situ aircraft profiles // *Atmos. Meas. Tech.* 2010. V. 3. P. 947–958.
- HITRAN. Molecular spectroscopic database. 2004. <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>.
- Kuze A., Suto H., Nakajima M., Hamazaki T.* Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring // *Appl. Optics.* 2009. V. 48. P. 6716–6733.
- Kuze A., Suto H., Shiomi K., Urabe T., Nakajima M., Yoshida J., Kawashima T., Yamamoto Y., Kataoka F., Buijs H.* Level 1 algorithms for TANSO on GOSAT: Processing and on-orbit calibrations // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 2447–2467. doi: 10.5194/amt-5-2447-2012
- Kort E.A., Frankenberg C., Miller C.E., Oda T.* Space-based observations of megacity carbon dioxide // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. № L17806. doi: 10.1029/2012GL052738.
- Morino I., Uchino O., Inoue M., Yoshida Y., Yokota T., Wennberg P.O., Toon G.C., Wunch D., Roehl C.M., Notholt J., Warneke T., Messerschmidt J., Griffith D.W.T., Deutscher N.M., Sherlock V., Connor B., Robinson J., Sussmann R., Rettinger M.* Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 1061–1076. doi: 10.5194/amt-4-1061-2011.
- NIES. Database of the GOSAT project // Courtesy JAXA/NIES/MOE. 2010. <https://data.gosat.nies.go.jp>.
- Notholt J., Blumenstock T., Brunner D., Buchmann B., Dils B., De Maziure M., Popp Ch., Sussmann R.* Product validation and algorithm selection report (PVASR) // ESA Climate Change Initiative (CCI). Final Rep. 22 August 2012. <http://www.esa-ghg-cci.org/?q=node/95>.
- Rinsland C.P., Jones N.B., Connor B.J., Logan J.A., Pougatchev N.S., Goldman A., Murcray F.J., Stephen T.M., Pine A.S., Zander R., Mahieu E., Demoulin P.* 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.
- Toon G.C., Farmer C.B., Schaper P.W., Lowes L.L., Norton R.H.* Composition measurements of the 1989 Arctic winter stratosphere by airborne infrared solar absorption spectroscopy // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 7939–7961. doi: 10.1029/91JD03114.
- Wunch D., Toon G., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O.* The Total Carbon Column Observing Network (TCCON) // *Philos. Trans. R. Soc. A.* 2011. V. 369. № 1943. P. 2087–2112.
- Yang Z., Toon G.C., Margolis J.S., Wennberg P.O.* Atmospheric CO<sub>2</sub> retrieved from ground-based near IR solar spectra // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 9. doi: 10.1029/2001GL014537.
- Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N., Kikuchi N., Nobuta K., Tran H., Morino I., Yokota T.* Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column abundances from short-wavelength infrared spectra observations by the Greenhouse gases observing satellite // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 717–734. doi: 10.5194/amt-4-717-2011.

## Comparison of Satellite (GOSAT) and Ground-Based Spectroscopic Measurements of CO<sub>2</sub> Content near Saint-Petersburg

N. M. Gavrilov, Yu. M. Timofeev

Comparison of atmospheric column mean mole fraction of carbon dioxide measured with ground-based Fourier-transform spectroscopy at the Peterhof station of Saint-Petersburg State University (59.9° N, 29.8° E) in 2009–2011 with similar data obtained with the Japanese GOSAT satellite is performed. The comparison shows that the average CO<sub>2</sub> mole fractions from satellite data version V01.xx are by  $-9.8 \pm 3$  ppm less than the corresponding values obtained from ground-based measurements. For the GOSAT data version V02.xx this average decrease is  $-4.7 \pm 2.6$  ppm. Some overestimating CO<sub>2</sub> measured near Saint-Petersburg compared to the TCCON ground based network is indirectly detected, reasons of which require further explanation.

**Keywords:** carbon dioxide, total content, ground-based measurements, FTIR spectroscopy, GOSAT satellite, comparison, validation