

УДК: 551.510.41

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ CO<sub>2</sub> ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2019 г. Ю.М. Тимофеев\*, И.А. Березин, Я.А. Виролайнен, М.В. Макарова,  
А.В. Поляков, А.В. Поберовский, Н.Н. Филиппов, С.Ч. Фока

Санкт-Петербургский государственный университет  
Россия, 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

\* E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Поступила в редакцию 24.07.2018 г.

После доработки 26.09.2018 г.

Представлены результаты исследований пространственно-временных вариаций содержания углекислого газа в районе Санкт-Петербурга на основе спутниковых (спутник ОСО-2) и наземных (спектроскопических и локальных) измерений за период 2014–2018 гг. По спутниковым данным полная амплитуда пространственно-временных вариаций для среднего отношения смеси CO<sub>2</sub> (XCO<sub>2</sub>) составила 57.7 ppm (более 14%). Максимальные пространственные вариации XCO<sub>2</sub> в течение одного дня наблюдений (17.03.2015) составили 46.8 ppm (более 10%).

Сопоставление спутниковых и наземных спектроскопических измерений содержания углекислого газа показало, что данные системы наблюдений NDACC после коррекции систематических отличий от системы TCCON могут быть использованы для валидации спутниковых измерений. Результаты наземных локальных исследований приземных отношений смеси CO<sub>2</sub> для Петергофа не коррелируют ни со спектроскопическими наземными, ни со спутниковыми данными – в силу мезомасштабных вариаций CO<sub>2</sub> и существенно различных пространственных усредняющих ядер прямых и дистанционных измерений.

**Ключевые слова:** вариации содержания CO<sub>2</sub>, Санкт-Петербург, спутник ОСО-2, наземные спектроскопические, локальные измерения

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-351553165-72>

### ВВЕДЕНИЕ

Углекислый газ является важнейшим антропогенным парниковым газом, и рост его содержания в значительной степени определяет изменения климата Земли за последние сто лет [1, 2]. В последние десятилетия ведутся регулярные измерения содержания CO<sub>2</sub> с помощью как наземных (локальных и дистанционных), так и спутниковых наблюдений. Так, например, существуют международная сеть наземных и мачтовых локальных измерений приземных концентраций CO<sub>2</sub>, спектроскопическая сеть TCCON (Total Carbon Column Observing Network) для определения среднего отношения смеси CO<sub>2</sub> (XCO<sub>2</sub>) [3], различные спутниковые приборы для таких наблюдений [4]. Другая спектроскопическая наземная сеть NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) измеряет содержание многих климатически важных атмосферных газов, в том числе и углекислого газа [5].

Спутниковые измерения CO<sub>2</sub> были начаты с помощью затменного метода на Шаттлах в 1983 г. [6], продолжены в 1985–1994 гг. (Фурье-спектрометр ATMOS (Atmospheric Trace Molecule Observing System)) [7]; они позволили получить вертикальные профили содержания CO<sub>2</sub> в стратосфере и мезосфере [8]. Потребности в изучении интенсивности различных источников и стоков, а также атмосферных циклов парниковых газов для прогнозов изменений климата Земли в XXI столетии стимулировали надирные спутниковые измерения общего содержания (ОС) этих газов.

Глобальные наблюдения за содержанием CO<sub>2</sub> были осуществлены с помощью аппаратуры SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY) и на спутнике GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) в 2009 г. [9, 10] на основе измерений отраженного солнечного излучения в ближней ИК области спектра. Данные об углекислом газе

были также получены по измерениям теплового ИК излучения приборами AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), TES (Fourier Transform Spectrometer) и IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) [11–13].

Отметим, что требования к точности измерений содержания  $\text{CO}_2$  очень высоки – в связи с его относительно малыми естественными вариациями. В СССР и России регулярно проводились наземные исследования содержания  $\text{CO}_2$  (см., например, [14–17]), а в последние годы и спутниковые наблюдения [18–19]. В 2014 г. начались измерения содержания  $\text{CO}_2$  на спутнике OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) [20].

## 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ $\text{CO}_2$ ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

В течение 2014–2018 гг. исследования пространственно-временных вариаций содержания  $\text{CO}_2$  вблизи Санкт-Петербурга были осуществлены нами с помощью:

- 1) анализа данных со спутника OCO-2;
- 2) наземных спектроскопических измерений с помощью Фурье-спектрометра Bruker 125HR [21];
- 3) локальных измерений приземного отношения смеси  $\text{CO}_2$ .

Отметим, что спутниковые и спектроскопические измерения осуществляются в условиях безоблачной атмосферы или при возможности измерений прямого солнечного излучения.

### 1.1. Спутниковые измерения

В июле 2014 г. был запущен спутник OCO-2 с надирным прибором, измерявшим солнечное отраженное излучение в ближней ИК области с высоким спектральным разрешением ( $\sim 17\,000$ ), высоким динамическим диапазоном ( $10^4$ ), хорошим отношением сигнал/шум ( $\sim 400$ ), достаточно высоким горизонтальным разрешением ( $\sim 1.5 \times 2.5 \text{ км}^2$ ) и высокой частотой измерений. Прибор фиксирует отраженное и рассеянное солнечное излучение в безоблачной атмосфере в трех полосах поглощения – в слабой (1.61 мкм) и сильной (2.06 мкм) полосах  $\text{CO}_2$  и полосе кислорода (0.76 мкм). Использование трех полос поглощения, специальные методики и алгоритмы интерпретации спутниковых данных, и, наконец, специальная калибровка и валидация результатов определения среднего

отношения смеси  $\text{XCO}_2$  (для сухой атмосферы) с помощью самолетных измерений и наземной спектроскопической сети TCCON позволили достичь высокой абсолютной и относительной точности измерений прибором OCO-2. Отметим, что величина  $\text{XCO}_2$  используется для исключения влияния вариаций приземного давления и водяного пара. По данным работы [22] средние абсолютные и среднеквадратические отличия от наземных результатов составляют менее 0.4 ppm и 1.5 ppm соответственно. Наш анализ изменчивости  $\text{XCO}_2$  позволил эмпирически оценить уровень случайных погрешностей измерений. Анализ показал, что значения среднеквадратических (СК) вариаций  $\text{XCO}_2$  для дней с числом измерений более 100 находится в подавляющем числе случаев в диапазоне 1.0–2.0 ppm (оценка СК погрешностей сверху, так как она включает естественные вариации  $\text{CO}_2$ ). Нижняя граница СК вариаций очень близка к оценкам работы [22].

### 1.2. Спектроскопические наземные измерения

Спектроскопические наземные определения содержания  $\text{CO}_2$  по прямому солнечному излучению осуществляются как в ближнем (сеть TCCON с 2004 г.), так и среднем ИК-диапазонах (сеть NDACC с 1991 г.). В Петергофе ( $59.88^\circ\text{N}$ ,  $29.82^\circ\text{E}$ ) измерения в средней ИК-области с помощью Фурье-спектрометра Bruker 125HR со спектральным разрешением  $0.005 \text{ см}^{-1}$  были начаты в 2009 г. Интерпретация спектров ИК солнечного излучения в СПбГУ проводится с помощью двух программных комплексов (ПК) – SFIT4 и PROFFIT. Эти программы отличаются рядом особенностей, но при использовании одинаковых входных данных и априорной информации дают результаты, согласующиеся в пределах случайной погрешности определения исследуемой газовой компоненты [23]. Для диагностирования содержания  $\text{CO}_2$  на станции St. Petersburg (Петергоф) использовались измерения прямого солнечного излучения в четырех "микро-окнах": 2620.55–2621.1, 2626.4–2626.85, 2627.1–2627.6 и 2629.275–2629.95  $\text{см}^{-1}$ . При учете вклада в бюджет ошибок неопределенности задания температурного профиля, нулевой линии, параметров аппаратной функции прибора, спектроскопических параметров и т. д., а также шума измерений, систематическая составляющая погрешности определения  $\text{XCO}_2$  в среднем оценена в 3.5–4.0%, случайная – 0.4–0.6%.

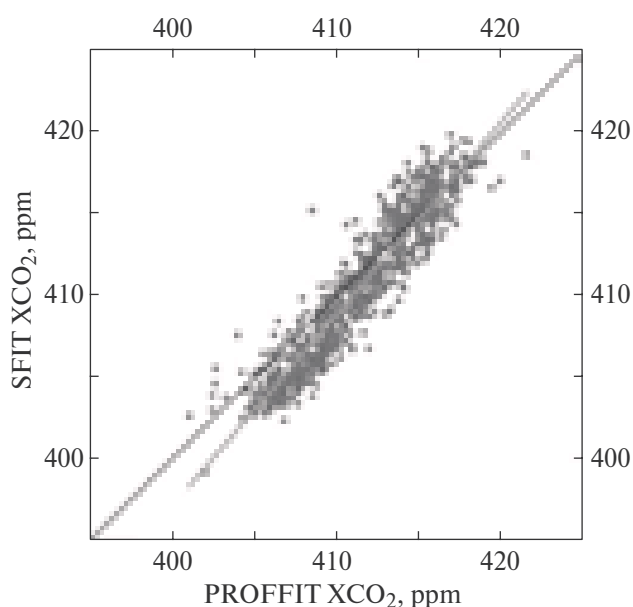
Теоретические оценки случайной погрешности хорошо согласуются с эмпирическими, полученными в работе [24] для тех же спектральных "микро-окон".

В качестве примера сопоставлений результатов интерпретации спектров с помощью двух ПК приведем рис. 1, на котором показана диаграмма рассеяния величин XCO<sub>2</sub> (в ppm), полученных в наземных экспериментах для рассматриваемого периода спутниковых измерений (сентябрь 2014 – апрель 2018 г., всего 2891 измерение). Среднее рассогласование в величинах XCO<sub>2</sub> при использовании двух ПК мало ~ 0.8 ppm (0.2%), а стандартное отклонение среднего, которое косвенно характеризует случайные погрешности измерений, составляет ~ 1.6 ppm (0.4%) при коэффициенте корреляции 0.94.

Другая наземная международная сеть наблюдений парниковых газов (TCCON) использует измерения прямого солнечного излучения в полосах CO<sub>2</sub> в ближней ИК области спектра. Разница в исходной измерительной информации (в том числе в особенностях молекулярного поглощения в используемых спектральных интервалах) приводит к разным характеристикам двух спектроскопических типов XCO<sub>2</sub> измерений (сети NDACC и TCCON). В работе [25] показано, что между их данными существуют систематические отклонения около 2.5%. Причинами этого могут быть разные усредняющие ядра дистанционных измерений при использовании различных спектральных интервалов, а также рассогласования параметров тонкой структуры молекулярного поглощения в разных спектральных областях. Как показывает наш анализ, в последнее десятилетие интенсивности и полуширины спектральных линий, используемых нами, менялись (в пределах 2–3%) в различных версиях базы HITRAN. Однако использование разных версий базы данных HITRAN не позволило исключить наблюдающиеся систематические отличия в XCO<sub>2</sub> при использовании измерений в двух спектральных областях.

### 1.3. Локальные наземные измерения

Круглосуточные определения приземных концентраций CO<sub>2</sub> были начаты в Петергофе в январе 2013 г. с использованием газоанализатора Los Gatos Research Greenhouse Gas Analyzer (LGR GGA-24-r-EP). Случайная погрешность измерений LGR GGA-24-r-EP лежит в пределах (150–50) ppb в зависимости от времени на-



**Рис. 1.** Диаграмма рассеяния величин XCO<sub>2</sub>, полученных с использованием ПК PROFFIT и SFIT4. PROFFIT: (411 ± 4) ppm; SFIT: (410 ± 4) ppm; разность: (0.2 ± 0.4) %; R = 0.94 ± 0.01.

копления (5–100 с), калибровка измерительной аппаратуры проводится не реже одного раза в неделю.

## 2. АНАЛИЗ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ CO<sub>2</sub> ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

В период с 06.09.2014 г. по 30.04.2018 г. в течение 83 дней со спутника OCO-2 было осуществлено 11 430 спектральных измерений вблизи Санкт-Петербурга (на расстоянии, не превышающем 120 км от Петергофской станции – в диапазоне координат 59.56–60.23° N и 29.09–31.05° E). Число спутниковых данных сильно меняется день ото дня – от одного до 726 измерений, в среднем оно составляет ~ 138. Примеры измерений XCO<sub>2</sub> представлены на рис. 2 в разные дни наблюдений.

Анализ содержания CO<sub>2</sub> для каждого дня измерений и всей их совокупности показывает следующее:

1. Дневные СК вариации XCO<sub>2</sub> достигают 11.3 ppm, что характеризует максимальные пространственные СК вариации XCO<sub>2</sub> для рассматриваемого региона (18.10.2016 г.), в среднем СК вариации составляют 2–4 ppm.

2. Минимальное наблюдавшееся единичное значение XCO<sub>2</sub> составляло 362.9 ppm (13.10.2015 г.), а максимальное – 424.3 ppm (03.07.2017 г.) за

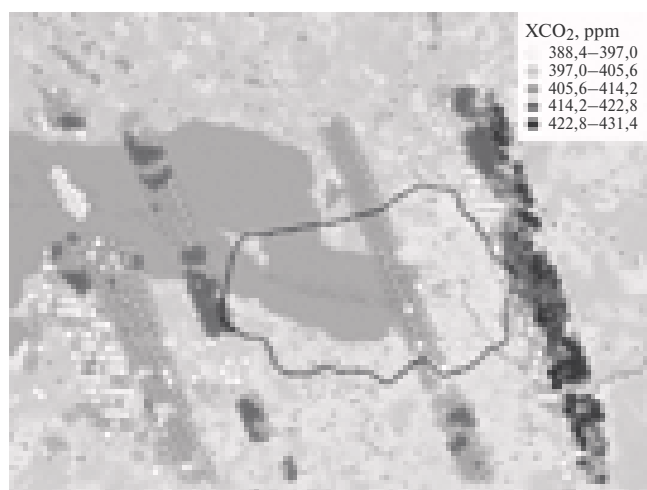
весь рассматриваемый период наблюдений для исследуемого района. Полная амплитуда пространственно-временных вариаций для  $\text{XCO}_2$  составляла 61.4 ppm, т. е. превышала 15% от среднего значения.

3. Для средних по дню измерений максимальное значение составляло 410.0 ppm, а минимальное – 375.1 ppm. В этом случае амплитуда вариаций составляла 34.9 ppm (~ 8.8%). С учетом анализа спутниковых данных примерно за 3.5 года в этих вариациях присутствует вклад тренда  $\text{CO}_2$  (порядка 8 ppm) и сезонные вариации, составляющие в районе Санкт-Петербурга ~ 4–5 ppm.

4. Максимальные пространственные вариации  $\text{XCO}_2$  в течение одного дня наблюдений составляли 43.2 ppm и превышали 8% (13.10.2015 г.).

Можно сделать вывод, что пространственные и временные вариации спутниковых измерений  $\text{XCO}_2$  в районе мегаполиса Санкт-Петербурга значительны, что обусловлено наличием многочисленных локальных антропогенных источников  $\text{CO}_2$ . При этом реальные пространственные вариации  $\text{XCO}_2$  могут быть еще больше указанных, так как величины содержания  $\text{CO}_2$  сглаживаются конечной угловой апертурой спутникового прибора.

Данные спутниковых измерений показывают, что пространственное распределение  $\text{CO}_2$  очень изменчиво и иногда максимальные значения  $\text{XCO}_2$  наблюдаются не в самом городе, а на его окраинах, где расположены тепловые электростанции и различные промышленные предприятия. Рис. 2 демонстрирует, что в процессе



**Рис. 2.** Пространственное распределение спутниковых измерений  $\text{XCO}_2$  вблизи Санкт-Петербурга в различные дни наблюдений (2014–2017 г.). Сплошная серая линия – Кольцевая автомобильная дорога (КАД).

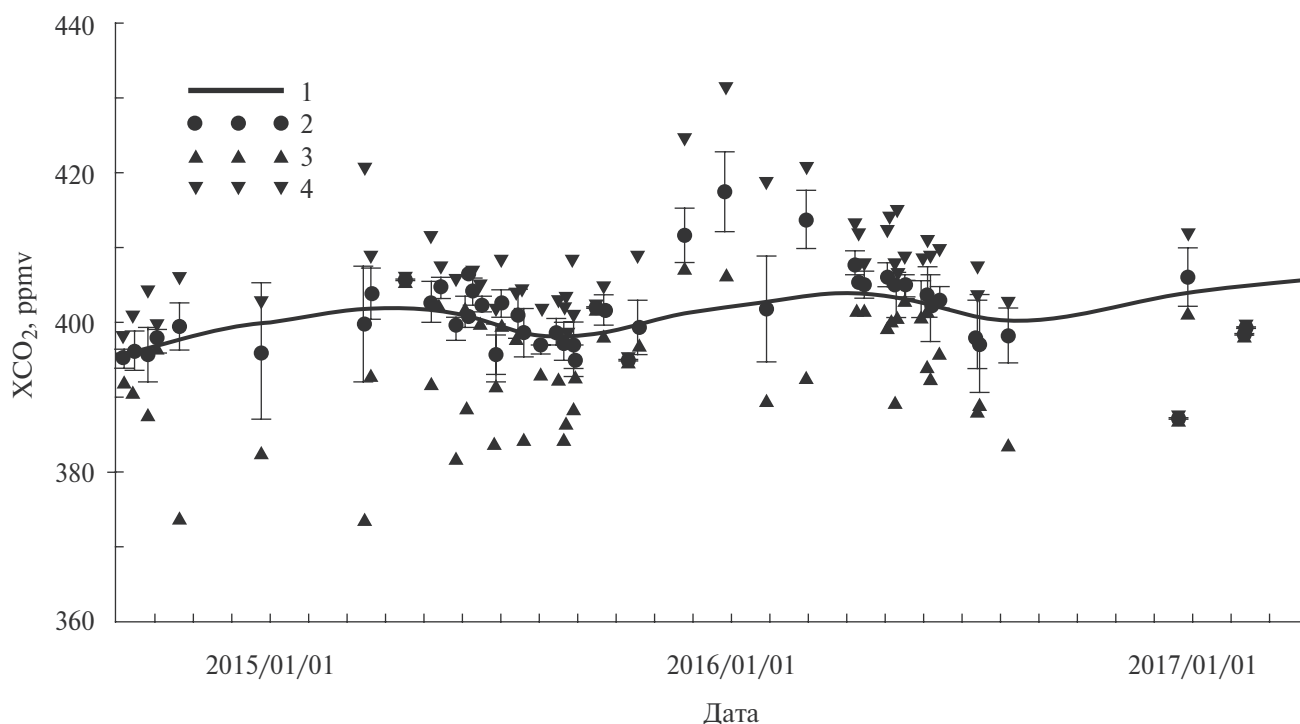
пространственного сканирования спутникового прибора по центру города содержание  $\text{CO}_2$  менялось в пределах 400–405 ppm (за исключением двух резких флуктуаций). На восточных окраинах они достигали значений 414–430 ppm, на западных (над Финским заливом) – 388–405 ppm. Несмотря на относительно малое количество измерений (83 дня, 8 дней в 2014 г., 28 дней в 2015 г., 25 дней в 2016 г., 15 дней в 2017 г., 7 дней в 2018 г.), данные спутниковых измерений демонстрируют наличие традиционного сезонного хода, например, в средних значениях  $\text{XCO}_2$  (минимальные значения  $\text{XCO}_2$ , наблюдаются летом, максимальные – зимой и ранней весной (рис. 3)) и качественное согласие с данными модели Мауна-Лоа для 60° N [25]. На рис. 3 также наглядно видна изменчивость содержания  $\text{CO}_2$  в отдельные месяцы в районе мегаполиса.

### 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ (OCO-2) С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Сопоставление наземных спектроскопических измерений  $\text{CO}_2$  со спутниковыми данными вблизи Петергофа было проведено для 36 совпадающих дней. В силу высокой частоты спутникового зондирования (~ 3 Гц), в отдельные дни имеется более 700 спутниковых данных, для точек, находящихся на различных расстояниях от Петергофа. Для сравнения использовались средние значения как наземных (среднедневные), так и спутниковых (средние за различные периоды – от 1–2 до 40 с) результатов. Максимальное удаление друг от друга для двух сравниваемых значений составляло 120 км. В таблице приведены статистические характеристики сопоставления наземных и спутниковых данных. Как видно из таблицы, наземные измерения  $\text{XCO}_2$  (для двух использованных программ интерпретации) дают значения, заметно превышающие (на 11.1–12.6 ppm) спутниковые данные. Стандартные отклонения составляют 2.0–2.6 ppm, т. е. менее 1%, а СКО достигают 11.3–12.9 ppm. Коэффициенты корреляции составляют ~ 0.86–0.90.

Уменьшение наших наземных спектроскопических результатов примерно на 2.5% привело к существенному уменьшению средних отклонений между спутниковыми и наземными данными (см. таблицу) – до 0.8–2.3 ppm и среднеквадратических отклонений – до 2.1–3.4 ppm (0.5–1%). Сравним полученные нами





**Рис. 3.** Сезонный ход средних (2), минимальных (3) и максимальных (4) значений XCO<sub>2</sub> в районе Санкт-Петербурга. 1 — расчет по модели Мауна-Лоа для 60° с. ш. Вертикальными отрезками показаны вариации, наблюдавшиеся в различные дни.

рассогласования с результатами сопоставлений данных OCO-2 с измерениями наземных станций TCCON. В статье [22] показано, что для различных станций средние отклонения находятся в диапазоне от  $-0.12$  до  $+3.21$  ppm (станция Sodankyla). При этом в большинстве случаев данные OCO-2 превышают результаты наземных измерений. Значения среднеквадратических отклонений находятся в диапазоне от 0.55 до 3.51 ppm (станция Tsukuba). Достаточно высокое СКО наблюдается и для станции Sodankyla (3.29 ppm). Коэффициент корреляции для разных станций находится в диапазоне от 0.58 до 1.0. Средние значения смещений по всем станциям сравнения составляют 0.22, а СКО — 1.31 ppm. Таким образом, данные измерений

XCO<sub>2</sub> в Петергофе после исключения систематического сдвига могут использоваться для валидации спутниковых данных. Хотя в дальнейшем следует оптимизировать спектральные окна, используемые на станциях NDACC.

Анализ результатов локальных измерений углекислого газа в Петергофе за 2013–2016 гг. показал, что среднегодовое значение концентрации CO<sub>2</sub> в 2016 г. составило  $(411 \pm 10)$  ppm при экстремальных значениях 399.5 ppm и 430.5 ppm, наблюдавшихся в августе и январе 2016 г. соответственно. Для приземной концентрации CO<sub>2</sub> характерен годовой ход, с 2013 по 2016 г. его амплитуда менялась от 20 до 30 ppm. Минимальные концентрации регистрируются днем, когда одновременно происходит активное

**Таблица.** Сопоставления наземных и спутниковых измерений XCO<sub>2</sub>

Сравниваемые ансамбли	Среднее отклонение, ppm	СКО, ppm	Стандартное отклонение, ppm	Коэффициент корреляции
PROFFIT – OCO-2	12.6	12.9	2.6	$0.86 \pm 0.04$
PROFFIT – OCO-2 с коррекцией в 2.5%	2.3	3.4	2.6	$0.86 \pm 0.04$
SFIT – OCO-2	11.1	11.3	2.0	$0.90 \pm 0.03$
SFIT – OCO-2 с коррекцией в 2.5%	0.8	2.1	2.0	$0.90 \pm 0.03$

конвективное перемешивание воздуха нижних и верхних слоев атмосферы и процессы фотосинтеза растений. За весь период измерений суточный ход концентрации углекислого газа для летнего периода имел максимальную амплитуду  $\sim 48$  ppm в июне 2013 г., минимальную  $\sim 30$  ppm – в июле 2016 г.

Сравнение результатов определения локального приземного отношения смеси  $\text{CO}_2$  со значениями среднего отношения для всей атмосферы, измеренными Фурье-спектрометром (около 2000 сопоставлений в течение более 300 дней (11.2011–11.2016 гг.)), показало отсутствие заметной корреляции между этими величинами ( $K \approx 0.1$ ) даже при ограничениях локальных концентраций значением 425 ppm. Средние значения  $\text{XCO}_2$  отличались незначительно ( $\sim 1$  ppm), но СК отличия между двумя типами измерений составляли  $\sim 18$  ppm.

Изменчивость результатов локальных измерений содержания  $\text{CO}_2$  значительно превышает изменчивость наземных дистанционных данных для всей толщи атмосферы. Для ансамбля сопоставлений диапазон изменчивости для первых составлял 374.6–507.3 ppm, для вторых – 396.5–421.4 ppm.

#### 4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведены исследования пространственно-временных вариаций содержания  $\text{CO}_2$  в районе Санкт-Петербурга за период 2014–2018 гг. на основе спутниковых данных (OCO-2), а также наземных спектроскопических и локальных измерений. Достаточно высокое горизонтальное разрешение ( $\sim 1.5 \times 2.5$  км<sup>2</sup>) и высокая точность ( $\sim 0.25$ – $0.5\%$ ) спутниковых данных дают возможность исследовать мезомасштабную изменчивость содержания  $\text{CO}_2$  вблизи различных мегаполисов и (при наличии достаточного числа измерений в исследуемом районе) позволяют определять и локализовать источники эмиссий  $\text{CO}_2$  [26].

1. Эмпирические оценки на основе анализа вариаций спутниковых (OCO-2) данных о  $\text{CO}_2$  позволили оценить диапазон СК случайной компоненты погрешностей (оценки сверху) для региона Санкт-Петербурга в 1–2 ppm ( $\sim 0.5\%$ ).

2. На основе спутниковых данных, имеющих для мегаполиса Санкт-Петербурга за 2014–2018 гг., можно сделать вывод, что пространственные и временные вариации среднего

отношения смеси  $\text{CO}_2$  ( $\text{XCO}_2$ ) значительны, что обусловлено наличием многочисленных локальных антропогенных источников  $\text{CO}_2$ . За весь рассматриваемый период наблюдений минимальное значение  $\text{XCO}_2$  составляло 3629 ppm, а максимальное – 4243. Полная амплитуда пространственно-временных вариаций для  $\text{XCO}_2$  составляла 61.44 ppm, т. е. превышала 15% от средней величины. В этих вариациях присутствует вклад тренда  $\text{CO}_2$  (порядка 8 ppm) и сезонные вариации, составляющие в районе Санкт-Петербурга  $\sim 4$ – $5$  ppm. Максимальные пространственные вариации  $\text{XCO}_2$  в течение одного дня наблюдений составляли 43.2 ppm и превышали 8% от среднего значения.

3. Сопоставление спутниковых данных о содержании  $\text{CO}_2$  с наземными спектроскопическими измерениями в Петергофе показало наличие систематических положительных смещений  $\text{XCO}_2$  примерно на 2.5%. После исключения этих смещений наземные измерения в системе наблюдений сети NDACC могут использоваться для валидации спутниковых измерений.

4. Наземные локальные измерения приземных отношений смеси  $\text{CO}_2$  в Петергофе не коррелируют заметно ни со спектроскопическими наземными, ни со спутниковыми данными как в силу мезомасштабных вариаций  $\text{CO}_2$ , так и существенно различных пространственных усредняющих ядер прямых и дистанционных измерений.

**Источник финансирования.** Исследования выполнены при финансировании гранта РФФИ № 14-17-00096. Авторы благодарят коллег из Годдардовского космического центра НАСА (Goddard Space Flight Center) за предоставление данных спутниковых измерений OCO-2 [27].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, et al.(eds.)] / Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 33 p.
2. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)] / IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.

3. *Wunch D., Toon G.C., Blavier J.F.L., et al.* The total carbon column observing network // *Philos. Trans. R. Soc. A-Math, Phys. Eng. Sci.* 2011. V. 369. P. 2087–2112.
4. Satellite Missions Database / <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/>
5. Network for the Detection of Atmospheric Composition Change / <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>
6. *Girard A., Besson J., Brard D., et al.* Global results of Grille spectrometer experiment on board Spacelab 1 // *Planet Space Sci.* 1988. V. 36. P. 291–300.
7. *Rinsland C. P., Gunson M. R., Zander R., López-Puertas M.* Middle and upper atmosphere pressure-temperature profiles and the abundances of CO<sub>2</sub> and CO in the upper atmosphere from ATMOS/Spacelab 3 observations // *J. Geoph. Res.* 1992. V. 97. № 18. P. 20 479–20 495.
8. *Тимофеев Ю.М.* Исследования атмосферы Земли методом прозрачности. СПб.: Наука, 2016. 367 с.
9. *Schneising O., Buchwitz M., Burrows J. P., et al.* Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 1: Carbon dioxide // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 3827–3853.
10. *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. Opt.* 2009. V. 48. № 35. P. 6716–6733.
11. *Olsen E.T.* AIRS Version 5 Release Tropospheric CO<sub>2</sub> Products / [https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3\\_ScienceData\\_Product\\_Documentation/3.3.4\\_Product\\_Generation\\_Algorithms/AIRS-V5-Tropospheric-CO2-Products.pdf](https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3_ScienceData_Product_Documentation/3.3.4_Product_Generation_Algorithms/AIRS-V5-Tropospheric-CO2-Products.pdf). 2002. 38 p.
12. *Kulawik S.S., Jones D.B.A., Nassar R., et al.* Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO<sub>2</sub> for carbon cycle science // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 5601–5623.
13. Algorithm Theoretical Basis Document for the LMD CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> IASI Products ‘CO2\_IAS\_NLIS’ and ‘CH4\_IAS\_NLIS’ of the Essential Climate Variable (ECV) Greenhouse Gases (GHG). Written by: Cyril Crevoisier, Laboratoire de Météorologie Dynamique, 2 Oct. 2015. 11 pp.
14. *Дианов-Клюков В.И.* Спектроскопические исследования фонового содержания газовых примесей в атмосфере // *Вестн. АН СССР.* 1980. Т. 4. С. 33–41.
15. *Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В.* Систематические измерения концентрации углекислого газа в атмосфере // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1990. Т. 26. № 6. С. 584–593.
16. *Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е. и др.* Содержание углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии (станция мониторинга "ИССЫК-КУЛЬ") // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 3. № 4. С. 521–530.
17. *Ракитин А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М. и др.* Вариации среднего по высоте отношения смеси CO<sub>2</sub> вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2013. Т. 49. № 3. С. 298–303.
18. *Рублев А.Н., Успенский А.Б.* Оценка концентрации углекислого газа в тропосфере по данным измерений спектрометра SCIAMACHY в условиях облачности // *Исслед. Земли из космоса.* 2006. № 6. С. 31–41.
19. *Кухарский А.В., Успенский А.Б.* Мониторинг содержания диоксида углерода в тропосфере над бореальными экосистемами Сибири // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2010. Т. 7. № 4. С. 204–211.
20. *Crisp D., Pollock H.R., Rosenberg R., et al.* The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 59–81.
21. *Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M., et al.* Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // *J. Mol. Spectr.* 2016. V. 323. P. 2–14.
22. *Wunch D., Wennberg P. O., Osterman G., et al.* Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO<sub>2</sub> measurements with TCCON // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 2209–2238.
23. *Hase F., Hannigan J.W., Coffey M.T., et al.* Inter-comparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements // *J. Quant. Spectr. Radiat. Trans.* 2004. V. 87. P. 25–52.
24. *Виrolайнен Я.А.* Методические аспекты определения содержания углекислого газа в атмосфере с помощью ИК-Фурье-спектроскопии // *Журн. прикл. спектроск.* Т. 85. № 3. С. 454–461.
25. *Barthlott S., Schneider M., Hase F., et al.* Using XCO<sub>2</sub> retrievals for assessing the long-term consistency of NDACC/FTIR data sets // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 1555–1573.
26. *Hakkarainen J., Ialongo I., and Tamminen J.* Direct space-based observations of anthropogenic CO<sub>2</sub> emission areas from OCO-2 // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 11.400–11.406.
27. GES DISC / [https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/OCO2\\_L2\\_Lite\\_FP\\_7r.html](https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/OCO2_L2_Lite_FP_7r.html)

## Spatial-temporal CO<sub>2</sub> variations near St. Petersburg based on satellite and ground-based measurements

Yu.M. Timofeyev\*, I.A. Berezin, Ya.A. Virolainen, M.V. Makarova, A.V. Polyakov,  
A.V. Poberovsky, N.N. Filippov, S.Ch. Foka

*Saint-Petersburg State University  
Universitetskaya nab., 7/9, St. Petersburg, 199034, Russia*

\* *E-mail: y.timofeev@spbu.ru*

Received: 24.07.2018

Revised version received: 26.09.2018

The results of studying spatial-temporal CO<sub>2</sub> variations near St. Petersburg during 2014–2017 based on satellite measurements (OSO-2 satellite), ground-based spectroscopic and local measurements are presented. According to satellite data the full amplitude of the spatial-temporal variations for the average CO<sub>2</sub> mixing ratio (XCO<sub>2</sub>) amounted to 57.7 ppm (over 14%). The maximal XCO<sub>2</sub> spatial variations during one day of observations (17.03.2015) were 46.8 ppm (more than 10%). Comparison of CO<sub>2</sub> satellite and ground-based spectroscopic measurements has shown that ground-based measurements in the NDACC observing system after correction of systematic differences from the TCCON system can be used for validation of satellite measurements. Ground-based local measurements of the near-surface CO<sub>2</sub> mixing ratio at Peterhof do not correlate with either spectroscopic ground-based or satellite measurements due to both mesoscale CO<sub>2</sub> variations and significantly different spatial averaging kernels of direct and remote measurements.

**Keywords:** variations of CO<sub>2</sub> content, St. Petersburg, OCO-2 satellite, ground-based spectroscopic, local measurements