«Оптика атмосферы и океана», **33**, № 7 (2020)
DOI: 10.15372/АОО20200706

УДК 551.510.41

Анализ содержания CO_2 вблизи российских городов по спутниковым измерениям ОСО-2

А.А. Никитенко, Ю.М. Тимофеев, И.А. Березин, Я.А. Виролайнен, А.В. Поляков*

Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., 1

Поступила в редакцию 25.02.2020 г.

На основе большого объема спутниковых измерений ОСО-2 (4,5 года, более 300 дней, более 50 000 измерений в пяти городах России) проанализированы пространственные и временные вариации содержания углекислого газа в окрестностях Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Магнитогорска и Норильска (в радиусе 100 км от центра городов). Сравнение этих измерений показали, что для данных с индексом качества «0» характерна относительная однородность полей содержания XCO_2. В частности, амплитуды их вариаций составляют 5–6%, а среднеквадратические вариации – менее 1%. Максимальные пространственные вариации составляют 2–4%, что существенно отличается от результатов анализа данных ОСО-2 индекса качества «1».

Ключевые слова: пространственно-временные вариации содержания CO_2, спутник ОСО-2, вариации XCO_2, ансамбль данных индекса качества «0», ансамбль данных индекса качества «1»; spatial-temporal variability of carbon dioxide, OCO-2 satellite, XCO_2 variations, XCO_2 data with a quality flag “0”, XCO_2 data with a quality flag “1”.

Введение

Рост содержания парниковых газов, прежде всего углекислого газа, является основной причиной современных изменений климата Земли [1]. При этом, несмотря на относительно небольшую площадь (~ 3%) территории городов, они ответственны за более чем 70% антропогенных эмиссий, обусловленных системами энергетического обеспечения [2, 3]. Поэтому исследования распределения содержания CO_2 в окрестностях городов, а также количественные оценки городских эмиссий в настоящее время представляют собой актуальную задачу.

Общее содержание CO_2 измеряется локальными и дистанционными методами [4–6]. Важную роль в мониторинге углекислого газа в последние годы играют спутниковые методы. Различная спутниковая аппаратура (SCIAMACHY, AIRS, GOSAT, OCO-2 и т.д.) после валидации с помощью наземных и самолетных измерений позволяет определять среднее отношение смеси CO_2 (XCO_2) с высокой точностью (0,25–0,5%). Достаточно высокое пространственное разрешение ряда приборов (например, OCO-2) позволяет исследовать пространственно-временные вариации содержания CO_2 [7–9], которые при соответствующих условиях дают возможность оценить антропогенные эмиссии в различных городах [10].

В настоящей работе проведен сравнительный анализ содержания и вариаций CO_2 для ряда российских городов (Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Магнитогорска и Норильска) с помощью данных измерений спутниковой аппаратуры ОСО-2. Отметим, что в работе используются данные индекса качества «0» (QF = 0, quality flag), т.е. более высокого качества, чем в [8, 9], где были представлены данные индекса качества «1» (QF = 1) с большой погрешностью.

Спутниковые измерения ОСО-2

Настоящие исследования опираются на данные спутниковой программы Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) [11–13]. Спутник ОСО-2 был запущен в июле 2014 г. на околополярную орбиту и предназначен для измерения общего содержания CO_2 с целью определения пространственно-временных вариаций содержания CO_2 и интенсивностей источников и стоков углекислого газа в региональном масштабе. Аппаратура ОСО-2 обладает потенциально высокой точностью измерений (0,25–0,5%) содержания CO_2 (для данных индекса качества «0»), высоким горизонтальным разрешением ($1{,}29 \times 2{,}25$ км^2) и пространственным охватом по трассе наблюдений ~ 10 км. Прибор, установленный на спутнике, измеряет спектры отраженного солнечного излучения

* Анастасия Андреевна Никитенко (nikki_nic@mail.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru); Иван Александрович Березин (vanchez100@yandex.ru); Яна Акселевна Виролайнен (yana.virolainen@spbu.ru); Александр Викторович Поляков (a.v.polyakov@spbu.ru).

© Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Березин И.А. и др., 2020

в ближней инфракрасной области в полосах, центрированных на 0,765 (кислородная А-полоса), 1,61 и 2,06 мкм (слабая и сильная полосы CO_2). Каждый спектральный канал ОСО-2 записывает 8 спектров одновременно, формируя след измерений шириной ~ 12,8 км. Отметим, что измерения используемым методом дают среднее по высоте отношение смеси CO_2 для сухой атмосферы XCO_2 в дневное время при отсутствии облаков в поле зрения прибора. В настоящей работе использовался режим прибора Nadir (надир), регистрирующий XCO_2 над сушей. Высота орбиты спутника — 705 км, период обращения — 98,8 мин, орбита синхронизирована с Солнцем, экватор пересекается в ~ 13:36 по местному времени. Траектории сканирования на поверхности Земли приблизительно повторяются каждые 16 дней, но точно не совпадают.

Интерпретация спутниковых измерений уходящего отраженного и рассеянного солнечного излучения является довольно сложной обратной задачей, и ее качество зависит от многих факторов: случайных и систематических погрешностей измерений излучения, используемой априорной информации, характеристик поверхности, влияния облаков и аэрозолей и т.д. Авторы космического эксперимента ОСО-2 уделяют значительное внимание качеству получаемых данных. Для этого используют различные фильтры данных с целью исключения измерений низкого качества. Количество этих фильтров достигает 19 [13], и в конечном счете часть данных исключается, а оставшаяся часть представлена двумя ансамблями, которые характеризуются индексами качества «0» и «1». Данные QF = 0 включают измерения высокого качества, а QF = 1 — среднего. Данных QF = 0 относительно мало, особенно в районах с большим числом облачных ситуаций.

Валидация спутниковых измерений XCO_2 показала, что абсолютные и среднеквадратичные отличия от наземных измерений TCCON составляют менее 0,4 и 1,5 ppm (0,1 и 0,4%) для данных индекса качества «0» [14]. Эмпирические оценки случайных погрешностей спутниковых измерений XCO_2 для данных индекса качества «1» в [8, 9] и анализируемые в настоящей работе измерения индекса качества «1» позволили получить оценки сверху в 1,0—2,0 ppm.

Города России, для которых проводилось исследование, различаются по следующим характеристикам (табл. 1): население меняется от 178 тыс. до 12,6 млн, площадь — от 26 до 2561 км^2, плотность населения — от 1048 до 6846 чел./км^2.

Анализ наблюдений выполнен для 2014—2018 гг. Число дней измерений в различные годы меняется от 1 до 12, количество самих измерений — от 19 до 1080 для выбранных городов. Это обусловлено как продолжительностью измерений в течение конкретного года, так и, прежде всего, облачным состоянием атмосферы в момент измерений. Несмотря на отмеченные особенности измерений XCO_2, спутник ОСО-2 позволил впервые получить уникальные данные о содержании углекислого газа с высоким пространственным разрешением, а также изучить его мезомасштабные вариации. Качество спутниковых данных зависит от многих факторов, в том числе от состояния атмосферы и характера подстилающей поверхности.

Анализ спутниковой информации

На рис. 1 приведены временные вариации среднедневных значений XCO_2 вблизи городов в 2014—2018 гг. Вертикальными линиями обозначено среднеквадратические отклонения (СКО) от среднего значения. Данные, полученные с помощью спутниковой аппаратуры ОСО-2, показывают наличие традиционного сезонного хода, а также качественное согласие с данными модели, построенной по измерениям на Мауна-Лоа [15] и адаптированной для соответствующих широт. Отметим, что QF = 0 в основном характерен для измерений в конце весны и летом. Их число существенно меньше, чем измерений с QF = 1 в более ранних работах [8, 9]. Максимальные значения XCO_2 наблюдаются в конце зимы и ранней весной, а минимальные — в конце лета. Максимальные значения XCO_2, как правило, превышают модельные, что обусловлено, вероятно, антропогенным вкладом зимой и весной. Минимальные значения чаще всего меньше модельных, что объясняется интенсивным поглощением CO_2 растениями в процессе фотосинтеза.

В табл. 2 представлена характеристика всех измерений. Количество дней измерений в различных городах (в радиусе 100 км от центра городов) составляло 30—42, а число измерений — несколько тысяч. Минимальные значения XCO_2 для всех городов очень близки (388,0—390,8 ppm) и относятся к началу рассматриваемого периода, а максимальные находятся в диапазоне 410,4—413,3 ppm. Полные амплитуды вариаций XCO_2 для различных городов также очень близки и составляют 20,1—22,6 ppm (5—6%). Максимальные пространственные вариации равны 9,2—15,3 ppm. Они минимальны

Таблица 1

Основные характеристики исследованных городов

Город	Координаты, с.ш., в.д.	Население, чел.	Площадь, км^2	Плотность населения, чел./км^2
Москва	55,75; 37,61	12 615 279	2562	4925
Санкт-Петербург	59,94; 30,31	5 383 890	1439	3837
Екатеринбург	56,51; 60,36	1 484 456	468	3169
Магнитогорск	53,41; 58,98	410 733	392	1048
Норильск	69,35; 88,20	178 000	26,07	6846

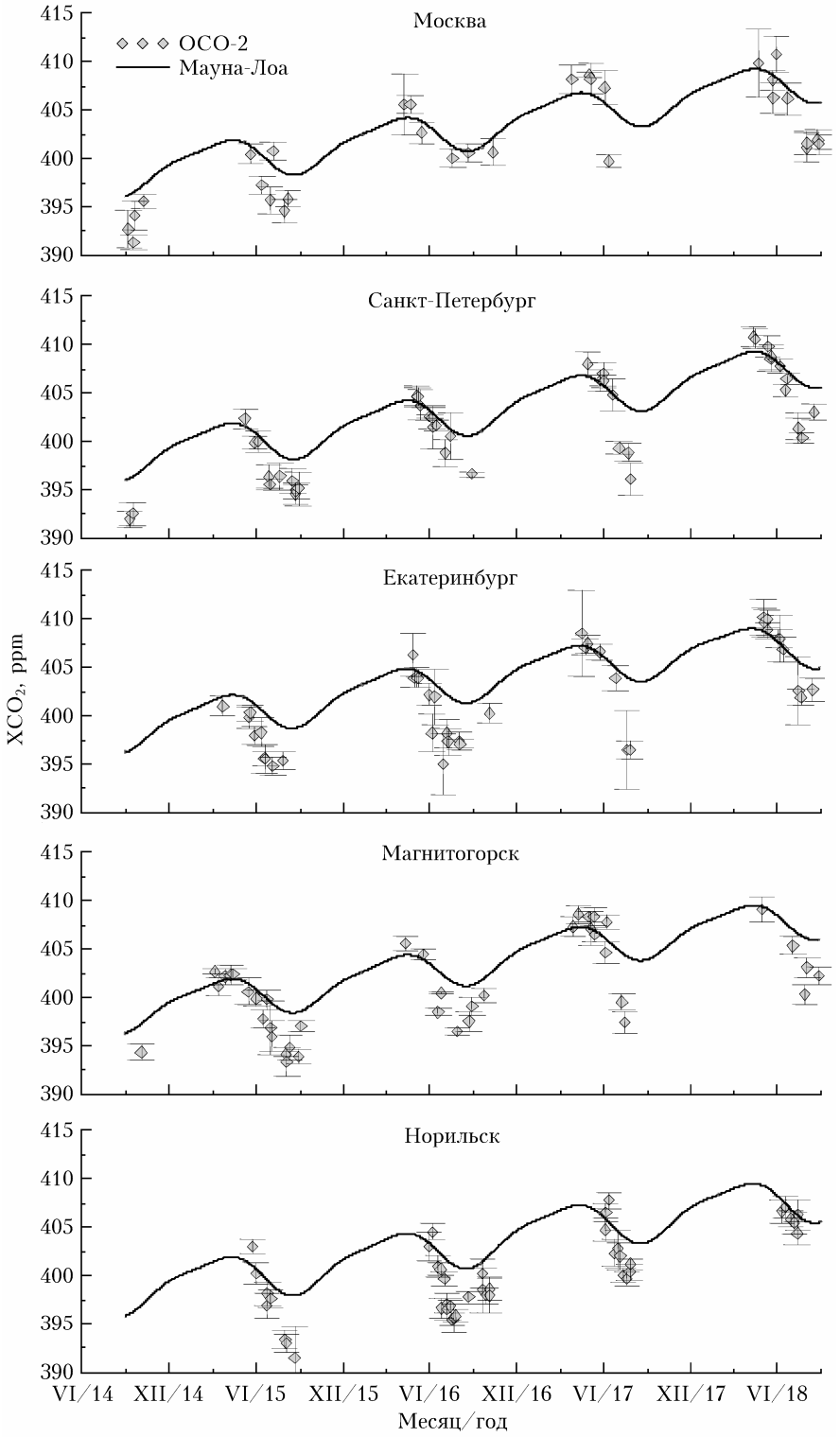

Рис. 1. Временные вариации среднедневных значений XCO_2 вблизи городов в 2014–2018 гг.

в Санкт-Петербурге и максимальны в Екатеринбурге. Максимальные и минимальные среднедневные значения XCO_2 в различных городах также меняются несущественно и отличаются на единицы ppm. Наконец, СКО в течение дня принимают значения от 0,1 до 4,5 ppm, и максимальное значение наблюдается в Екатеринбурге. Отметим, что СКО характеризуют не только естественные вариации XCO_2, но и погрешности измерений CO_2. Как показывают данные табл. 2, основные пространственно-

Таблица 2

Характеристики измерений XCO_2 для различных городов

Город	Кол-во дней	Число измерений	Минимальные/максимальные значения, ppm	Полная амплитуда вариаций, ppm (%)	Максимальные пространственные вариации, ppm (%)	Минимальные и максимальные среднедневные значения, ppm	СКО в течение дня, ppm
Москва	30	2653	390,8/412,3	21,5 (~5)	13,5 (~3)	391,3/410,8	0,3–3,5
Санкт-Петербург	42	3139	390,4/413,0	22,6 (~6)	9,2 (~2)	392,0/410,9	0,2–2,4
Екатеринбург	39	4003	393,2/413,3	20,1 (~5)	15,3 (~4)	394,8/410,3	0,5–4,5
Магнитогорск	40	2777	389,4/411,0	21,6 (~5)	10,2 (~3)	393,3/409,1	0,1–2,8
Норильск	42	5541	388,0/410,4	22,4 (~6)	11,1 (~3)	391,4/407,8	0,6–3,2

временные параметры содержания CO_2 в рассмотренных регионах очень близки, несмотря на значительные различия в характеристиках городов.

Напомним, что числа табл. 2 относятся к ансамблю измерений ОСО-2 индекса качества «0» и заметно отличаются от результатов подобного анализа для ансамбля данных индекса качества «1» [8, 9]. Основное отличие состоит в величинах вариаций XCO_2: для QF = 0 они в несколько раз меньше (табл. 3).

Отметим значительные амплитуды вариаций CO_2 для ансамбля данных QF = 1 (9–13%) по сравнению с ансамблем с QF = 0 (4–5%). Существенные отличия видны и для СКО: для данных индекса качества «1» оно выше в 3–5 и более раз.

Возможной причиной обнаруженных различий может быть существенная разница в качестве двух ансамблей данных («0» и «1»). Если минимальные СКО XCO_2 для данных QF = 0 составляют 0,1–0,3 ppm (см. табл. 3), то для данных QF = 1 – около 1,0–1,5 ppm. Подобные результаты были получены в эмпирических оценках погрешностей измерений XCO_2 среднего качества (индекса «1»), проведенных ранее в [8, 9], а также в независимых оценках погрешностей в [16]. Но одни погрешности ~ 1,0–1,5 ppm не могут объяснить сильные вариации XCO_2 (амплитуды и СКО) для ансамбля данных индекса качества «1».

Второй причиной может быть разный характер расположения данных относительно центров городов и сезоны измерений XCO_2 для двух ансамблей измерений ОСО-2. На рис. 2 в качестве примера приведены данные для двух городов (Москвы и Санкт-Петербурга), показывающие число измерений в различные месяцы года для данных индекса качества «0» и обоих ансамблей («0» + «1») измерений ОСО-2. Видно, что число измерений суммарного ансамбля в 5–10 раз больше ансамбля с QF = 0. Кроме того, суммарные данные относятся ко всем 12 месяцам года, а данные индекса «0» приведены только с марта по сентябрь для Москвы и с марта по август для Санкт-Петербурга. Для ансамбля с индексом качества «0» отсутствуют данные в зимний период, но в целом большой временной разницы между двумя ансамблями измерений не наблюдается. На рис. 3 приведены измерения ОСО-2 для двух городов, характеризующие пространственное распределение данных с разными индексами качества.

Как следует из рис. 2 и 3, для обоих городов распределения числа измерений, сделанных на разной удаленности от центра, имеют примерно одинаковый вид.

Дополнительной информацией для анализа являются измерения приземных концентраций CO_2 в СПбГУ в Старом Петергофе [17]. Анализ отдельных измерений показывает, что за исследуемый период амплитуда вариаций содержания CO_2 достигала 20–40%. Однако подчеркнем, что эти значения характерны не для общего содержания CO_2, а для приземных концентраций. Наконец, в Петергофе с 2009 г. осуществляются спектроскопические наземные измерения XCO_2 [18]. В 2014–2018 гг. амплитуда вариаций XCO_2 составляла 28 ppm (7,0%), а СК вариации – 0–4,7 ppm. Но эти значения характеризуют только временные вариации XCO_2. С учетом вклада в вариации XCO_2 долговременного тренда XCO_2 (~ 2 ppm/год) [19] спектроскопические данные согласуются с результатами анализа измерений ОСО-2 с индексом качества «0».

Таким образом, в настоящее время трудно однозначно объяснить отличия в вариациях содержания CO_2 вблизи исследованных городов при анализе данных ОСО-2 различного качества. Для этого требуются дальнейшие исследования.

Таблица 3

Характеристики ансамблей измерений XCO_2 индексов качества «0» и «1»

Город	QF = 1			QF = 0		
	Минимальные/максимальные значения, ppm	Амплитуда, ppm/%	СКО, ppm	Минимальные/максимальные значения, ppm	Амплитуда, ppm/%	СКО, ppm
Москва	366,7/413,8	47,1/12	1,1–15,8	391,3/410,8	19,5/5	0,3–3,5
Санкт-Петербург	375,1/410,0	34,9/8,8	0,8–11,3	392,0/410,9	18,9/5	0,2–2,4
Норильск	354,1/409,1	55,0/13	0,4–25,5	391,4/407,8	16,4/4	0,6–3,2

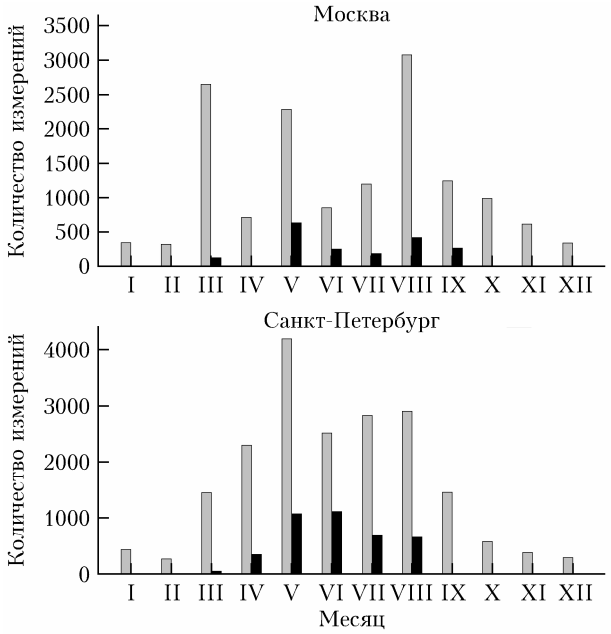

Рис. 2. Временное распределение измерений ОСО-2 для индекса качества «0» (черные столбцы) и суммарного ансамбля «0» + «1» (серые столбцы)

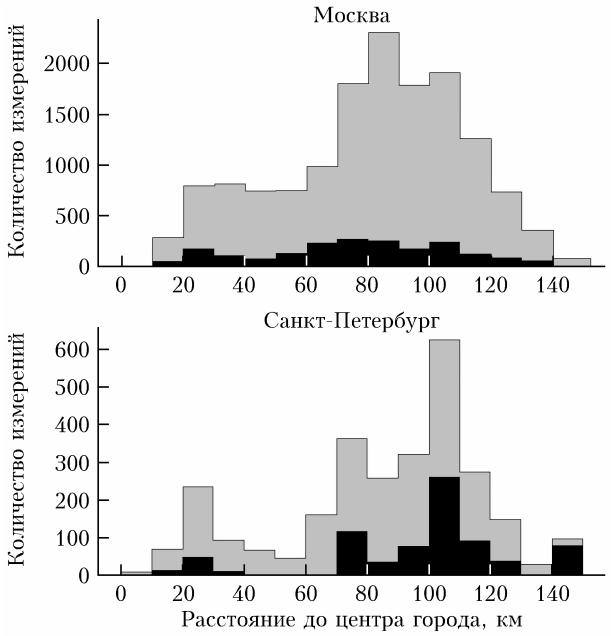

Рис. 3. Пространственное распределение измерений ОСО-2 относительно центра городов для индекса качества «0» (черный цвет) и суммарного ансамбля «0» + «1» (серый цвет)

Заключение

На основе большого объема измерений спутника ОСО-2 (4,5 года измерений, более 300 дней, более 50000 измерений в пяти регионах России) проанализированы пространственные и временные вариации содержания углекислого газа. Спутниковая аппаратура ОСО-2 обладает потенциально высокой точностью измерений (0,25–0,5%) содержания CO_2 (для данных QF = 0), высоким горизонтальным разрешением ($1{,}29 \times 2{,}25$ км^2) и пространственным охватом по трассе наблюдений ~ 10 км, что открывает определенные возможности анализа пространственной и временной изменчивости значений среднего отношения смеси углекислого газа для сухой атмосферы XCO_2. В настоящей работе рассмотрены измерения CO_2 в окрестностях Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Магнитогорска и Норильска (в радиусе 100 км от центра городов) и получены следующие результаты.

1. Анализ данных индекса качества «0» показывает наличие пространственно-временных вариаций содержания CO_2 вблизи городов относительно небольшой амплитуды – 20,1–22,6 ppm (5–6%), а также СКО = 0,2–3,5 ppm, что составляет менее 1%.

2. Наблюдается относительная однородность полей содержания CO_2 вокруг исследованных городов. Максимальные пространственные вариации XCO_2 при этом составляют 2–4%.

3. Полученные характеристики пространственно-временных вариаций XCO_2 для ансамблей данных ОСО-2 QF = 0 значительно отличаются от данных анализа измерений QF = 1 [8, 9].

4. Очевидной причиной обнаруженных отличий могут быть значительные погрешности измерений XCO_2 в ансамбле данных индекса качества «1», на что косвенно указывают заметные различия значений СКО для двух ансамблей ОСО-2. Если минимальные СКО XCO_2 для данных QF = 0 составляют 0,1–0,3 ppm, то для данных QF = 1 – около 1,0–1,5 ppm. Подобные погрешности были получены также в эмпирических оценках для ансамбля измерений XCO_2 среднего качества (индекс «1») разными авторами. Но только увеличение погрешностей до ~ 1,0–1,5 ppm не может объяснить существенные вариации XCO_2 (амплитуды и СКО) для ансамбля «1».

5. Анализ независимых наземных локальных и спектроскопических измерений CO_2 в районе Санкт-Петербурга показывает наличие вариаций приземных концентраций амплитудой 20–40%, обусловленных антропогенными факторами, но также дает относительно небольшие амплитуды спектроскопических измерений содержания CO_2.

Для однозначной интерпретации обнаруженных особенностей в содержании CO_2 вблизи исследуемых городов требуются дальнейшие исследования.

Авторы выражают благодарность американским ученым Калифорнийского технологического института за предоставленные данные спутниковых измерений ОСО-2.

1. *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 / R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf (last access: 22.07.2019).
2. *Hopkins F.M., Ehleringer J.R., Bush S.E., Duren R.M., Miller C.E., Lai C.-T., Hsu Y.-K., Carranza V., Randerson J.T.* Mitigation of methane emissions in cities: How new measurements and partnerships can contribute

to emissions reduction strategies // Earth's Future. 2016. V. 4. P. 408–425.
3. *Zhao X., Marshall J., Hachinger S., Gerbig C., Frey M., Hase F., Chen J.* Analysis of total column CO_2 and CH_4 measurements in Berlin with WRF-GHG // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 11279–11302.
4. *Wunch D., Toon G.C., Blavier J.F.L. et al.* The total carbon column observing network // Philos. Trans. R. Soc. A. 2011. V. 369. P. 2087–2112.
5. *Satellite* Missions Database [Electronic resource]. URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/ (last access: 25.01.2020).
6. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофонов А.В., Бабченко С.В., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh.Sh., Sasakawa Motoki, Shimoyama Ko.* Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
7. *Hakkarainen J., Ialongo I., Tamminen J.* Direct space-based observations of anthropogenic CO_2 emission areas from OCO-2 // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 11,400–11,406. DOI: 10.1002/2016GL070885.
8. *Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Поляков А.В., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Фока С.Ч.* Пространственно-временные вариации содержания CO_2 по данным спутниковых и наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2019. Т. 55, № 1. С. 65–72.
9. *Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Никитенко А.А.* Анализ мезомасштабных вариаций содержания углекислого газа вблизи мегаполиса Москвы по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 4. С. 263–270. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-263-270.
10. *Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Поберовский А.В., Макарова М.В., Поляков А.В.* Оценки антропогенных эмиссий CO_2 Москвы и Санкт-Петербурга по спутниковым измерениям OCO-2 // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 4. С. 261–265.
11. *Jet* Propulsion Laboratory. California Institute of Technology [Electronic resource]. URL: https://ocov2.jpl.nasa.gov/ (last access: 25.01.2020).
12. *Orbiting* Carbon Observatory-2 Launch (Press Kit) // NASA. 2015. URL: https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/oco2-launch-press-kit.pdf (last access: 25.01.2020).
13. *Eldering A., O'Dell C.W., Wennberg P.O., Crisp D., Gunson M.R., Viatte C., Avis C., Braverman A., Castano R., Chang A., Chapsky L., Cheng C., Connor B., Dang L., Doran G., Fisher B., Frankenberg C., Fu D., Granat R., Hobbs J., Lee R.A.M., Mandrake L., McDuffie D., Miller C.E., Myers V., Natraj V., O'Brien D., Osterman D.B., Oyafuso F., Payne V.H., Pollock H.R., Polonsky I., Roehl C.M., Rosenberg R., Schwandner F., Smyth M., Tang V., Taylor T.E., To C., Wunch D., Yoshimizu J.* The Orbiting Carbon Observatory-2: First 18 months of science data products // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10. P. 549–563. DOI: 10.5194/amt-10-549-2017.
14. *Wunch D., Wennberg P.O., Osterman G., Fisher B., Naylor B., Roehl C.M., O'Dell C., Mandrake L., Viatte C., Kiel M., Griffith D.W.T., Deutscher N.M., Velazco V.A., Notholt J., Warneke T., Petri C., De Maziere M., Sha M.K., Sussmann R., Rettinger M., Pollard D., Robinson J., Morino I., Uchino O., Hase F., Blumenstock T., Feist D.G., Arnold S.G., Strong K., Mendonca J., Kivi R., Heikkinen P., Iraci L., Podolske J., Hillyard P.W., Kawakami S., Dubey M.K., Parker H.A., Sepulveda E., Garcha O.E., Te Y., Jeseck P., Gunson M.R., Crisp D., Eldering A.* Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO_2 measurements with TCCON // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10. P. 2209–2238.
15. *Barthlott S., Schneider M., Hase F., Wiegele A., Christner E., González Y., Blumenstock T., Dohe S., Garcha O.E., Sepúlveda E., Strong K., Mendonca J., Weaver D., Palm M., Deutscher N.M., Warneke T., Notholt J., Lejeune B., Mahieu E., Jones N., Griffith D.W.T., Velazco V.A., Smale D., Robinson J., Kivi R., Heikkinen P., Raffalski U.* Using XCO_2 retrievals for assessing the long-term consistency of NDACC/FTIR data sets // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 1555–1573.
16. *Liang A., Gong W., Han G., Xian C.* Comparison of satellite-observed XCO_2 from GOSAT, OCO-2, and ground-based TCCON // Remote Sesing. 2017. V. 9. P. 1033. DOI: 10.3390/rs9101033.
17. *Фока С.Ч., Макарова М.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М.* Временные вариации концентрации CO_2, CH_4 и CO в пригороде Санкт-Петербурга (Петергоф) // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 10. С. 860–866.
18. *Timofeyev Yu., Virolainen Ya., Makarova M., Poberovsky A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H.* Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // J. Mol. Spectrosc. 2016. V. 323. P. 2–14. DOI: 10.1016/j.jms.2015.12.007.
19. *Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х.* Оценки трендов содержания климатически важных атмосферных газов вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2020. Т. 56, № 1. С. 97–103. DOI: 10.1134/S0002351520010083.

A.A. Nikitenko, Yu.M. Timofeev, I.A. Berezin, A.V. Poberovskii, Ya.A. Virolainen, A.V. Polyakov. **The analysis of OCO-2 satellite measurements of CO_2 in the vicinity of Russian cities.**

CO_2 spatial and temporal variability in five Russian regions has been analyzed on the basis of OCO-2 satellite measurements (more than 300 days during 4.5 years, more than 50 000 measurements). The Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) allows measurements of CO_2 content with a high accuracy (0.25–0.5%) (for data with a quality flag "0"), a high horizontal resolution (1.29×2.25 км^2), and a spatial coverage along paths of ~10 km. That makes it possible to analyze the spatial and temporal variations in CO_2 column-averaged dry-air mole fractions (XCO_2). XCO_2 OCO-2 data with quality flag "1" has lower measurement accuracy, but the number of such measurements is 5–10 times greater than that with quality flag "0". XCO_2 satellite measurements with quality flag "0" in the vicinity of Moscow, Saint Petersburg, Yekaterinburg, Magnitogorsk, and Norilsk (circles with a radius of 100 km from the city centers) have been analyzed. Comparisons of the measurements in different cities and regions show that XCO_2 datasets with a quality flag "0" are homogeneous, the amplitude of XCO_2 variations amounts to 5–6%, root mean square variations are less than 1%. The maximum values of XCO_2 spatial variations totals 2–4%, which differs significantly from the results of the analysis of OCO-2 XCO_2 data with quality flag "1".