Анализ мезомасштабных вариаций содержания углекислого газа вблизи мегаполиса Москвы по спутниковым данным

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

Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Углекислый газ является важнейшим антропогенным парниковым газом, требующим непрерывного контроля за изменчивостью его содержания в атмосфере. В настоящее время мониторинг содержания углекислого газа осуществляется с помощью различных дистанционных и локальных методов. Спутниковые методы позволяют исследовать пространственные и временные вариации углекислого газа в районе мегаполисов, где присутствуют его разнообразные антропогенные источники, локализовать отдельные районы источников и даже оценить интенсивности их эмиссий. В настоящей работе проведены исследования мезомасштабных пространственных и временных вариаций содержания углекислого газа в окрестностях Москвы в течение 2014–2018 гг. Для анализа были использованы измерения надирным прибором, находящимся на борту спутника OCO-2 и измеряющим солнечное излучение в ближней ИК-области спектра. Обнаружены значительные пространственные и временные вариации углекислого газа в районе московского мегаполиса, обусловленные наличием многочисленных антропогенных источников. По спутниковым данным, полная амплитуда пространственно-временных вариаций среднего для сухой атмосферы отношения смеси углекислого газа за рассматриваемый период составила 70 ppm, превысив 17 % от среднего. Максимальные пространственные вариации среднего отношения смеси углекислого газа в течение одного дня наблюдений составили 50,1 ppm, превысив 13 %.

Ключевые слова: вариации содержания углекислого газа, мегаполис Москва, спутник OCO-2, мониторинг углекислого газа в 2014–2018 гг.

Одобрена к печати: 18.03.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-263-270

Введение

Контроль содержания важнейшего антропогенного парникового газа CO_2 осуществляется в настоящее время различными дистанционными и локальными методами (A Guidebook..., 2017; Technical Report..., 2009). Для этого используются сети наземных локальных измерений (см., например, http://www.voeikovmgo.ru/index.php?option=com_content&view=category&id=37&lang=ru), наземные спектроскопические измерения на сетях TCCON (http://www.tccon.caltech.edu/) и NDACC (http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/), наблюдения на высотных вышках, эпизодические измерения в отдельных научных институтах (Арефьев и др., 2014; Аршинов и др., 2009, 2012; Рокотян и др., 2014; Timofeyev et al., 2016). В настоящее время значительную роль играют различные спутниковые методы и приборы (AIRS, GOSAT, OCO-2, IASI и т. д.), подробную информацию о которых можно получить на сайте https://en.wikipedia.org/wiki/Space-based_measurements_of_carbon_dioxide. При использовании всех этих измерений, например для определения интенсивностей эмиссий CO_2, важное значение имеет валидация и взаимная калибровка различных измерительных систем. Так, с помощью специальных самолётных и наземных измерений сети TCCON все системы приводятся к шкале ВМО (Messerschmidt et al., 2011).

В июле 2014 г. был запущен спутник OCO-2 с надирным прибором, измеряющим солнечное излучение в ближней ИК-области с высоким спектральным разрешением (~17 000) и динамическим диапазоном (10^4), хорошим отношением сигнал/шум (~400), а также достаточно высокими горизонтальным разрешением (~1,5×2,5 км) и частотой измерений (около 24 измерений в секунду). Прибор определяет отражённое и рассеянное солнечное излучение для

безоблачной атмосферы в трёх полосах поглощения: в слабой (1,61 мкм), сильной (2,06 мкм) полосах углекислого газа и в полосе кислорода (0,76 мкм). Измерения в трёх полосах поглощения, специальные методики и алгоритмы интерпретации спутниковой информации и, наконец, специальная калибровка и валидация определяемых значений среднего для сухой атмосферы отношения смеси углекислого газа (XCO_2) с помощью самолётных измерений и наземной спектроскопической сети TCCON позволили достичь высокой абсолютной и относительной точности данных прибора OCO-2. Отметим, что величины XCO_2 вместо общего содержания CO_2 используются для исключения влияния вариаций приземного давления и водяного пара. По данным работы (Wunch et al., 2017), абсолютные и среднеквадратические отличия спутниковых измерений от наземных составляют менее 0,4 и 1,5 ppm соответственно.

Спутниковые измерения CO_2 относительно высокого горизонтального разрешения позволяют исследовать пространственные и временные вариации в районе мегаполисов (Биненко и др., 2015; Timofeyev et al., 2019), где присутствуют многочисленные разнообразные антропогенные источники CO_2, локализовывать отдельные районы источников (Hakkarainen et al., 2016, 2018) и даже оценивать интенсивности их эмиссий (Nassar et al., 2017; Xinxin et al., 2017). Настоящая работа посвящена анализу спутниковых данных OCO-2 для изучения мезомасштабных вариаций CO_2 в районе Москвы. Ранее подобные исследования были проведены для района Санкт-Петербурга (Timofeyev et al., 2019).

Спутниковые измерения в районе Москвы

В период с 06.09.2014 по 31.08.2018 спутником OCO-2 вблизи Москвы (в пределах, удалённых от центра города не более чем на 100 км) было осуществлено 9406 измерений в течение 70 дней. В *табл. 1* приведено распределение по годам количества дней, в которые были произведены измерения. Отметим, что таких дней относительно мало — от 8 до 22 в год. Основной причиной тому являются облака, так как замеры OCO-2 возможны только при их отсутствии. Количество спутниковых измерений в разные дни колеблется от 1 до 685. Измерения в течение дня (в силу их высокой частоты) характеризуют пространственные вариации XCO_2 в районе Москвы.

Таблица 1. Количество дней, в которые были проведены измерения OCO-2, в различные годы

Год	2014	2015	2016	2017	2018
Количество дней	8	15	22	9	16

Анализ изменчивости XCO_2 в течение продолжительных серий измерений над однородной поверхностью и в условиях однородной атмосферы позволяет независимо и эмпирически оценить (сверху) случайные погрешности спутниковых данных. В *табл. 2* приведены такие оценки для различных дней измерений. В ней также указаны число измерений в течение дня, среднедневные значения XCO_2 и среднеквадратические вариации XCO_2.

Таблица 2. Оценки случайных погрешностей измерений XCO_2

Дата	Число измерений	Среднедневное значение, ppm	Среднеквадратические вариации, ppm
08.10.2014	375	395,59	1,25
15.05.2016	155	402,97	1,11
18.07.2016	214	400,35	1,17
02.05.2017	110	408,55	1,83
18.03.2018	612	404,30	1,35
27.08.2018	668	401,13	1,41

Полученные нами оценки случайных погрешностей измерений XCO_2 близки к результатам, приведённым в работе (Wunch et al., 2017), особенно с учётом того, что в наших оценках присутствует компонента естественной изменчивости XCO_2 в течение измерений.

Карта измерений OCO-2 в районе Москвы представлена на *рис. 1*. На ней сохранена геометрия пикселей, в которых проводились измерения. Спутник OCO-2 не даёт сплошного охвата территории, его полосы измерений (ширина ~10 км, в полосе 8 измерений) расположены случайным образом, над некоторыми территориями измерения осуществлялись несколько раз, но ещё больше территорий вообще не были охвачены за четыре года функционирования спутника. Несмотря на отмеченные особенности измерений OCO-2 и трудности их использования, например для оценок интенсивностей источников CO_2, эти измерения уникальны. За четыре года вокруг Москвы в течение 70 дней осуществлено более 9000 измерений XCO_2 высокой точности (~0,25 %). Подобной информативной системы мониторинга XCO_2 в московском мегаполисе не существует. В зависимости от территории и времени измерений содержание CO_2 сильно варьируется. Максимальные значения наблюдаются восточнее Москвы, а минимальные — на западе. С учётом частого западного переноса и прохождения воздуха через Москву такой эффект ожидаем.

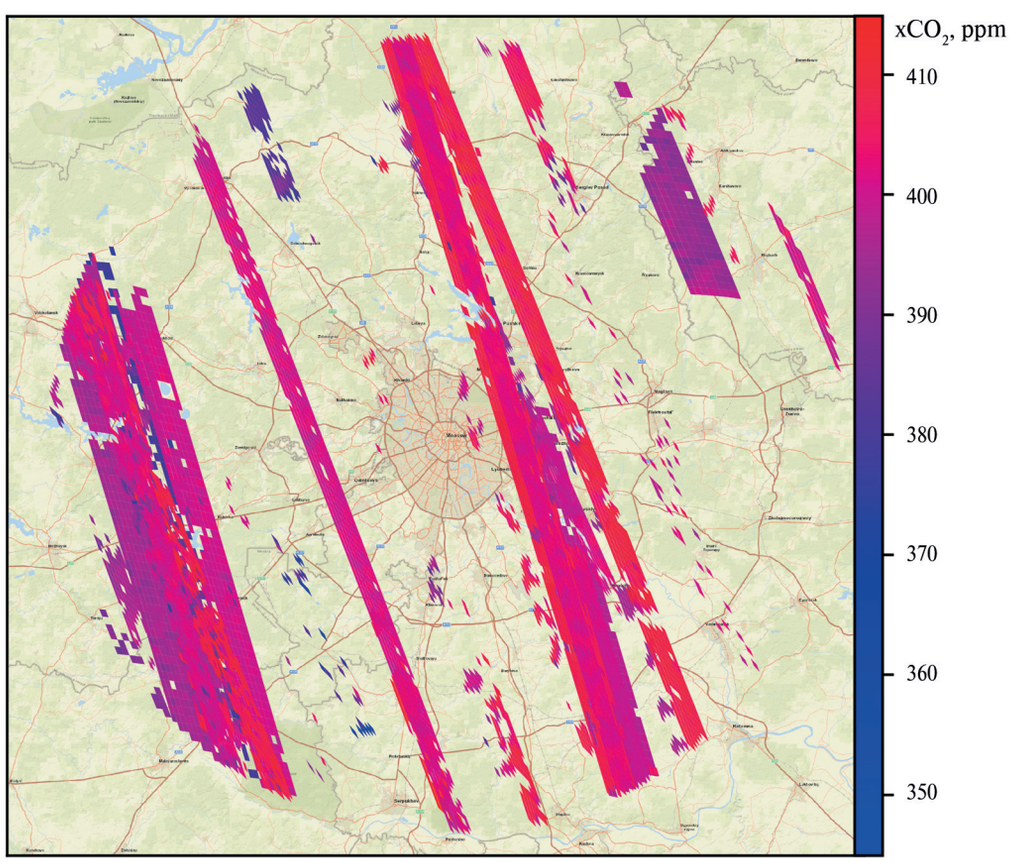

Рис. 1. Спутниковые измерения OCO-2 в районе Москвы (территория радиусом 100 км от центра города) за четыре года

Примеры пространственных вариаций XCO_2 различного типа приведены на *рис. 2* и *3*, на которых можно увидеть явные области повышенного и пониженного содержания XCO_2. Отметим, что каждая серия измерений длится порядка 10 с. Две наиболее однородные серии показаны на *рис. 2* для 15.05.2016 и 18.07.2016. На фоне случайных вариаций в измерениях XCO_2 15.05.2016 наблюдаются отдельные всплески, достигающие 2–4 ppm. 18.07.2016 наряду с подобными случайными вариациями заметен также медленный рост (с ~399 до 402 ppm) с увеличением амплитуд флуктуаций.

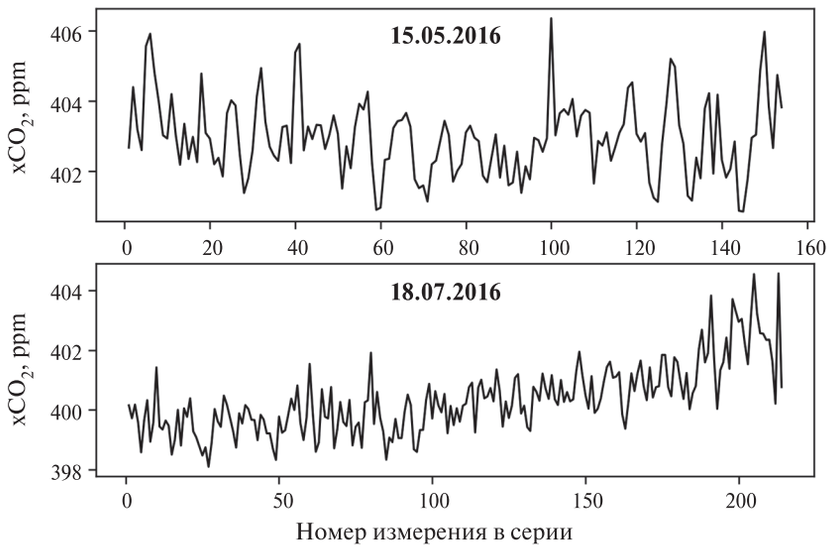

Рис. 2. Пространственная изменчивость XCO_2 (стабильные случаи)

Случаи значительных вариаций XCO_2 21.08.2016 и 04.02.2016 приведены на *рис. 3.* Измерения OCO-2 21.08.2016 начинаются с содержания CO_2 около 400 ppm, а затем снижаются до 382–383 ppm с очень малыми флуктуациями. Высокие значения наблюдаются на юге от Москвы, на ~17 ppm меньше — на севере. Днём 04.02.2016 флуктуации XCO_2 очень велики (от~350 до ~400 ppm), но для их объяснения требуется более детальное исследование.

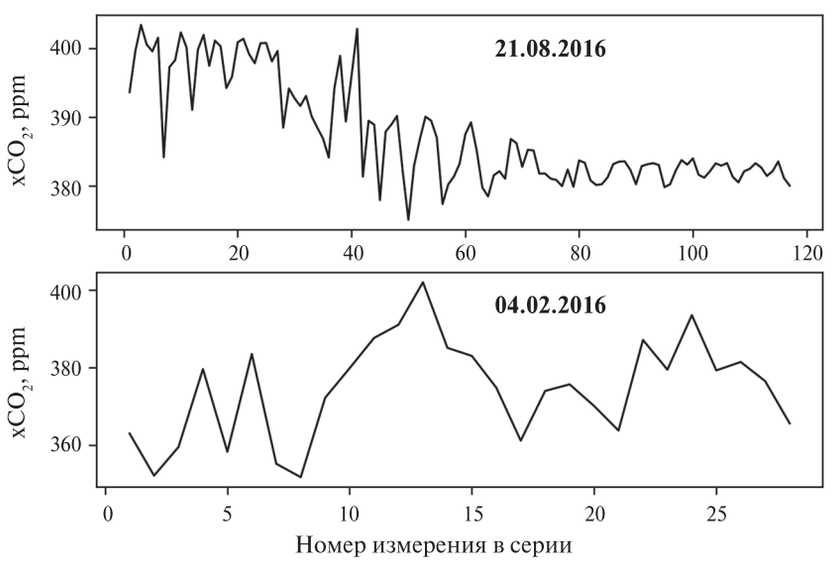

Рис. 3. Пространственная изменчивость XCO_2 (нестабильные случаи)

Данные спутниковых измерений демонстрируют как наличие традиционного сезонного хода, например в среднедневных значениях XCO_2 (минимальные значения XCO_2 наблюдаются летом, максимальные — зимой и ранней весной), так и качественное согласие с данными модели, построенной по измерениям в обсерватории Мауна-Лоа (Barthlott et al., 2015) и адаптированной для 55,8° с. ш. (*рис. 4*). Виден и долговременный тренд XCO_2 с 2014 по 2018 г. На *рис. 4* также наглядно показана сильная изменчивость содержаний XCO_2 в отдельные месяцы в районе мегаполиса.

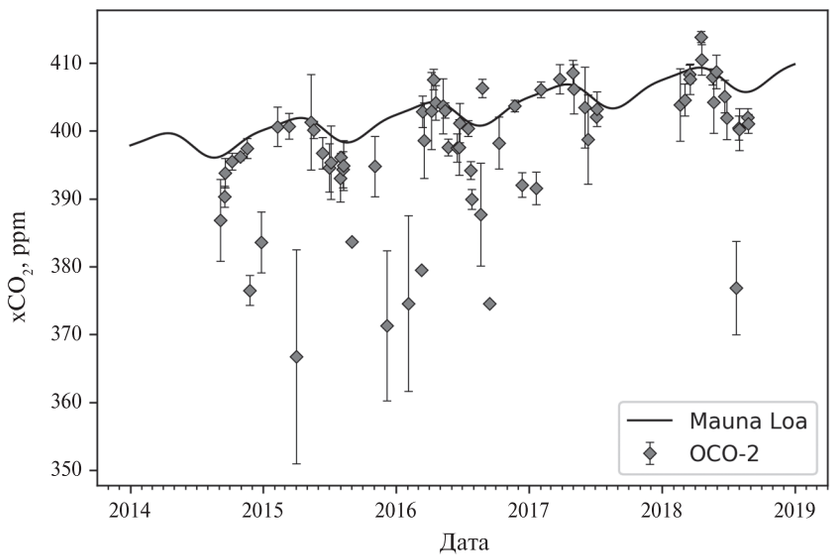

Рис. 4. Временной ход среднедневных данных XCO_2. Вертикальные отрезки — пространственные СК-вариации в течение дня. Сплошная кривая — модель по данным обсерватории Мауна-Лоа для 55,8° с. ш.

Анализ вариаций XCO_2 для каждого дня измерений и всей совокупности данных показывает следующее:

1. Минимальное значение XCO_2 за весь рассматриваемый период наблюдений для исследуемого района было зарегистрировано 02.04.2015 — 345,0 ppm, максимальное зафиксировано 21.04.2018 — 414,9 ppm. Полная амплитуда пространственно-временных вариаций для XCO_2 составила ~70 ppm, т. е. превысила 17 % от средних значений.
2. Максимальные пространственные вариации XCO_2 в течение одного дня наблюдений были равны 50,1 ppm, превысив 13 % (04.02.2016).
3. Для среднедневных измерений максимальное значение составило 413,8 ppm (19.04.2018), а минимальное — 366,7 ppm (02.04.2015). В этом случае полная амплитуда вариаций была 47,1 ppm (~12 %). Анализ спутниковых данных за четыре года показал, что в этих вариациях присутствует вклад тренда CO_2 (порядка 8–9 ppm).
4. Среднеквадратические (СК) вариации XCO_2 в течение дня меняются от 1,1 ppm (15.05.2016) до 15,8 ppm (02.04.2015), что характеризует максимальные пространственные СК-вариации XCO_2 для рассматриваемого региона. В среднем дневные СК-вариации составляют 3–6 ppm.

Можно сделать вывод, что пространственные и временные вариации спутниковых измерений XCO_2 в районе Москвы значительны, что обусловлено наличием многочисленных локальных антропогенных источников CO_2. Величины этих вариаций близки к значениям, полученным нами в районе Санкт-Петербурга (Timofeyev et al., 2019). При этом реальные пространственные вариации XCO_2 могут быть ещё больше, так как измеренные величины XCO_2 сглаживаются конечной угловой апертурой спутникового прибора OCO-2.

Заключение

На основе анализа спутниковых измерений (спутник OCO-2) в течение около четырёх лет показано, что мезомасштабные вариации содержания XCO_2 в районе Москвы значительны. Это обусловлено наличием многочисленных локальных антропогенных источников CO_2. По спутниковым данным, полная амплитуда пространственно-временных вариаций для среднего отношения смеси CO_2 (XCO_2) составила за период 2014–2018 гг. 70 ppm, превысив

17 % от средних значений. Максимальные пространственные вариации XCO_2 в течение одного дня наблюдений составили 50,1 ppm, превысив 13 %. СК-вариации XCO_2 в течение дня меняются от 1,1 до 15,8 ppm, что характеризует максимальные пространственные СК-вариации XCO_2 для рассматриваемого региона, в среднем СК-вариации составляют 3–6 ppm.

Литература

1. *Арефьев В. Н.*, *Каменоградский Н. Е.*, *Кашин Ф. В.*, *Шилкин А. В.* Фоновая составляющая концентрации двуокиси углерода в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск») // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 6. С. 655–662.
2. *Аршинов М. Ю.*, *Белан Б. Д.*, *Давыдов Д. К.*, *Inoue G.*, *Maksutov Sh.Sh.*, *Machida T.*, *Фофонов А. В.* Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 5. С. 457–464.
3. *Аршинов М. Ю.*, *Белан Б. Д.*, *Давыдов Д. К.*, *Креков Г. М.*, *Фофонов А. В.*, *Бабченко С. В.*, *Inoue G.*, *Machida T.*, *Maksutov Sh.*, *Sasakawa M.*, *Shimoyama K.* Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 12. С. 1051–1061.
4. *Биненко В. И.*, *Решетников А. И.*, *Шевчук Н. О.* Анализ изменчивости концентрации углекислого газа на основе наземных и спутниковых измерений на региональном уровне // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 38. С. 175–187.
5. *Рокотян Н. В.*, *Имасу Р.*, *Захаров В. И.*, *Грибанов К. Г.*, *Хаматнурова М. Ю.* Амплитуда сезонного цикла CO_2 в атмосфере Уральского региона по результатам наземного и спутникового ИК-зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 9. С. 819–825.
6. A Guidebook on the Use of Satellite Greenhouse Gases Observation Data from Verification of Greenhouse Gases Emission Inventories. Japan: National Institute for Environmental Studies, 2017. 124 p.
7. *Barthlott S.*, *Schneider M.*, *Hase F.*, *Wiegele A.*, *Christner E.*, *González Y.*, *Blumenstock T.*, *Dohe S.*, *García 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 // Atmospheric Measurement Techniques. 2015. V. 8. P. 1555–1573.
8. *Hakkarainen J.*, *Ialongo I.*, *Tamminen J.* Direct space-based observations of anthropogenic CO_2 emission areas from OCO-2 // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. P. 11400–11406.
9. *Hakkarainen J.*, *Ialongo I.*, *Maksyutov S.*, *Crisp D.* Global XCO_2 anomalies as seen by Orbiting Carbon Observatory-2 // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2018. URL: https://doi.org/10.5194/acp-2018-649 (Manuscript under review).
10. *Messerschmidt J.*, *Geibel M. C.*, *Blumenstock T.*, *Chen H.*, *Deutscher N. M.*, *Engel A.*, *Feist D. G.*, *Gerbig C.*, *Gisi M.*, *Hase F.*, *Katrynski K.*, *Kolle O.*, *Lavrič J. V.*, *Palm M.*, *Ramonet M.*, *Rettinger M.*, *Schmidt M.*, *Sussmann R.*, *Toon G. C.*, *Truong F.*, *Warneke T.*, *Wennberg P. O.*, *Wunch D.*, *Xueref-Remy I.* Calibration of TCCON column-averaged CO_2: the first aircraft campaign over European TCCON sites // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. P. 10765–10777.
11. *Nassar R.*, *Hill T. G.*, *McLinden C. A.*, *Wunch D.*, *Jones D. B. A.*, *Crisp D.* Quantifying CO_2 emissions from individual power plants from space // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. P. 10045–10053.
12. Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases. GAW Report No. 184. Geneva: World Meteorological Organization, 2009. 29 p.
13. *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. Molecular Spectroscopy. 2016. V. 323. P. 2–14.
14. *Timofeyev Yu. M.*, *Berezin I. A.*, *Virolainen Ya. A.*, *Makarova M. V.*, *Polyakov A. V.*, *Poberovsky A. V.*, *Filippov N. N.*, *Foka S. Ch.* Spatial-temporal CO_2 variations near St. Petersburg based on satellite and ground-based measurements // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55. No. 1. P. 58–63.
15. *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.*, *García 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 // Atmospheric Measurement Techniques. 2017. V. 10. P 2209–2238.

16. *Xinxin Y.*, *Lauvaux T.*, *Kort E. A.*, *Oda T.*, *Feng S.*, *Lin J. C.*, *Yang E.*, *Wu D.* Constraining fossil fuel CO_2 emissions from urban area using OCO-2 observations of total column CO_2 // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2017. URL: https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2017-1022/ (Manuscript under review).

Analysis of mesoscale variability of carbon dioxide in the vicinity of Moscow megacity based on satellite data

Yu. M. Timofeyev, I. A. Berezin, Ya. A. Virolainen, M. V. Makarova, A. A. Nikitenko

Saint Petersburg State University, *St. Petersburg 199034*, *Russia*
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Carbon dioxide is the most important anthropogenic greenhouse gas that requires continuous monitoring of variability of its content in the atmosphere. Currently, it is carried out using different remote and local methods. Satellite-based methods allow investigating spatial and temporal variations of carbon dioxide in the vicinity of megacities that have various anthropogenic carbon dioxide sources. Moreover, they can provide information on localization of such sources and even allow estimating the intensity of their emission. We present an analysis of mesoscale spatial and temporal variations of carbon dioxide content in the vicinity of Moscow megacity in the period of 2014–2018. For the analysis, we took carbon dioxide data obtained using measurements of solar radiation in the near infrared spectral range by nadir viewing instrument onboard the OCO-2 satellite. We observe significant spatial and temporal variations of carbon dioxide in the Moscow region which are mainly caused by the presence of numerous anthropogenic sources. According to satellite data, the full amplitude of spatio-temporal variations for the carbon dioxide column-averaged dry-air mole fraction amounts to 70 ppm, exceeding by 17 % the mean values. The maximum spatial variations during one day of observations totals 50.1 ppm, exceeding by 13 %.

Keywords: carbon dioxide variations, Moscow megacity, OCO-2 satellite, carbon dioxide monitoring in 2014-2018

Accepted: 18.03.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-263-270

References

1. Aref'ev V. N., Kamenogradskii N. E., Kashin F. V., Shilkin A. V., Fonovaya sostavlyayushchaya kontsentratsii dvuokisi ugleroda v prizemnom vozdukhe (stantsiya monitoringa "Obninsk") (A background component of carbon dioxide in the surface air (Obninsk monitoring station)), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 50, No. 6, pp. 655–662.
2. Arshinov M. Yu., Belan B. D., Davydov D. K., Inoue G., Maksutov Sh. Sh., Machida T., Fofonov A. V., Vertikal'noe raspredelenie parnikovykh gazov nad Zapadnoi Sibir'yu po dannym mnogoletnikh izmerenii (The vertical distribution of greenhouse gases over Western Siberia based on long-term observations), *Optika atmosfery i okeana*, 2009, Vol. 22, No. 5, pp. 457–464.
3. Arshinov M. Yu., Belan B. D., Davydov D. K., Krekov G. M., Fofonov A. V., Babchenko S. V., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K., Dinamika vertikal'nogo raspredeleniya parnikovykh gazov v atmosphere (The dynamics of greenhouse gases vertical distribution in the atmosphere), *Optika atmosfery i okeana*, 2012, Vol. 25, No. 12, pp. 1051–1061.
4. Binenko V. I., Reshetnikov A. I., Shevchuk N. O., Analiz izmenchivosti kontsentratsii uglekislogo gaza na osnove nazemnykh i sputnikovykh izmerenii na regional'nom urovne (The analysis of carbon dioxide concentration variability on regional scale using ground- and satellite-based measurements), *Uchenye zapiski RGGMU*, 2015, No. 38, pp. 175–187.

5. Rokotyan N. V., Imasu R., Zakharov V. I., Gribanov K. G., Khamatnurova M. Yu., Amplituda sezonnogo tsikla CO_2 v atmosfere Ural'skogo regiona po rezul'tatam nazemnogo i sputnikovogo IK-zondirovaniya (CO_2 seasonal cycle amplitude over Ural region according to ground- and satellite-based IR remote sensing measurements), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 9, pp. 819–825.
6. *A Guidebook on the Use of Satellite Greenhouse Gases Observation Data from Verification of Greenhouse Gases Emission Inventories*, Japan: National Institute for Environmental Studies, 2017, 124 p.
7. Barthlott S., Schneider M., Hase F., Wiegele A., Christner E., González Y., Blumenstock T., Dohe S., García 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, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, Vol. 8, pp. 1555–1573.
8. Hakkarainen J., Ialongo I., Tamminen J., Direct space-based observations of anthropogenic CO_2 emission areas from OCO-2, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, pp. 11400–11406.
9. Hakkarainen J., Ialongo I., Maksyutov S., Crisp D., Global XCO_2 anomalies as seen by Orbiting Carbon Observatory-2, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2018, available at: https://doi.org/10.5194/acp-2018-649 (Manuscript under review).
10. Messerschmidt J., Geibel M. C., Blumenstock T., Chen H., Deutscher N. M., Engel A., Feist D. G., Gerbig C., Gisi M., Hase F., Katrynski K., Kolle O., Lavrič J. V., Palm M., Ramonet M., Rettinger M., Schmidt M., Sussmann R., Toon G. C., Truong F., Warneke T., Wennberg P. O., Wunch D., Xueref-Remy I., Calibration of TCCON column-averaged CO_2: the first aircraft campaign over European TCCON sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11, pp. 10765–10777.
11. Nassar R., Hill T. G., McLinden C. A., Wunch D., Jones D. B. A., Crisp D., Quantifying CO_2 emissions from individual power plants from space, *Geophysical Research Letters*, 2017, Vol. 44, pp. 10045–10053.
12. *Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases*, *GAW Report No. 184*, Geneva: World Meteorological Organization, 2009, 29 p.
13. 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. Molecular Spectroscopy*, 2016, Vol. 323, pp. 2–14.
14. Timofeyev Yu. M., Berezin I. A., Virolainen Ya. A., Makarova M. V., Polyakov A. V., Poberovsky A. V., Filippov N. N., Foka S. Ch., Spatial-temporal CO_2 variations near St. Petersburg based on satellite and ground-based measurements, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 58–63.
15. 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., García O. E., Te Y., Jeseck P., Gunson M. R., Crisp D., Eldering A., Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO2 measurements with TCCON, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, Vol. 10, pp. 2209–2238.
16. Xinxin Y., Lauvaux T., Kort E. A., Oda T., Feng S., Lin J. C., Yang E., Wu D., Constraining fossil fuel CO_2 emissions from urban area using OCO-2 observations of total column CO_2, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2017, available at: https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2017-1022/ (Manuscript under review).