

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.41

# Оценки антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> для Москвы и Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений ОСО-2

Ю.М. Тимофеев, И.А. Березин, Я.А. Виролайнен,  
А.В. Поберовский, М.В. Макарова, А.В. Поляков\*

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

Поступила в редакцию 17.02.2020 г.

На основе измерений содержания углекислого газа спутниковой аппаратурой ОСО-2 с помощью боксовой модели определены антропогенные эмиссии CO<sub>2</sub> для мегаполисов Москвы и Санкт-Петербурга. Эмиссии CO<sub>2</sub> для Санкт-Петербурга 1.03.2016 и 12.05.2018 г. составили 80 и 74 т/(км<sup>2</sup> · сут). Эмиссии CO<sub>2</sub> для Москвы составили 123, 179 и 186 т/(км<sup>2</sup> · сут) 25.08.2018, 22.06.2018 и 26.03.2017 г. соответственно. Сопоставления полученных результатов с оценками, сделанными для других мегаполисов, показали, что эмиссии для Санкт-Петербурга близки к значениям Лос-Анджелеса и Берлина, а для Москвы – к средним значениям Лондона. Погрешность определения эмиссий зависит в первую очередь от величины антропогенного вклада, варьируя от 30 до ~90%.

*Ключевые слова:* спутниковые измерения, углекислый газ, оценки антропогенных эмиссий, спутник ОСО-2, боксовая модель, временная изменчивость CO<sub>2</sub>; *satellite measurements, carbon dioxide, estimation of anthropogenic emissions, ОСО-2 satellite, box model, CO<sub>2</sub> temporal variations.*

### Введение

Изменения климата Земли, обусловленные главным образом ростом содержания парниковых газов, делают необходимым мониторинг их концентраций в атмосфере, а также изучение их стоков и источников, в особенности антропогенного характера [1, 2]. Для решения этих задач используются наземные, самолетные и спутниковые измерения.

В мировом масштабе городские территории занимают лишь ~3% площади суши [3], при этом на их долю приходится почти 70% антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> [4]. В последние годы интенсивно развивается метод определения эмиссий, основанный на использовании данных спутниковых измерений пространственно-временных вариаций полей содержания парниковых газов и различных численных моделей формирования этих полей [5]. Спутниковые измерения содержания CO<sub>2</sub> проводились с помощью различных дистанционных методов и аппаратуры SCIAMACHY, AIRS, TES, IASI, GOSAT, ОСО-2 и др. [5]. Следует отметить, что с учетом относительно малых вариаций содержания CO<sub>2</sub>

в земной атмосфере требования к точности измерений очень высокие – погрешности не должны превышать 0,25–0,5% [6].

В настоящее время используются разные методики для оценки антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> по спутниковым данным в зависимости от характеристик последних: боксовая модель, модель локальных выбросов, решение обратной задачи атмосферной динамики.

Боксовая модель использует результаты измерений, проводимых как в фоновой, так и в загрязненной атмосфере, с целью определения антропогенного вклада. В модели локальных выбросов используются результаты измерений в районах с четко фиксируемой эмиссией газа и их аналитическая аппроксимация. Обратная задача атмосферной динамики решается при изучении более обширных территорий с набором разных источников, и эта методика считается наиболее подходящей для анализа отдельных городов. Но она требует использования высококачественных трехмерных численных моделей динамики и иногда – химии атмосферы, адаптированных к исследуемой территории.

Примеры успешного использования спутниковых данных GOSAT и ОСО-2 для определения интенсивности эмиссий CO<sub>2</sub> приведены в [7–9]. Цель работы – получение оценок антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> для Москвы и Санкт-Петербурга. В настоящем исследовании применялась боксовая модель в тех случаях, когда из спутниковых измерений ОСО-2

\* Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru); Иван Александрович Березин (vanchez100@yandex.ru); Яна Акселевна Виролайнен (yana.virolainen@spbu.ru); Анатолий Васильевич Поберовский (avrob@troll.phys.spbu.ru); Мария Владимировна Макарова (m.makarova@spbu.ru); Александр Викторович Поляков (a.v.polyakov@spbu.ru).

было возможно определить значения как в условиях фонового состояния атмосферы, так и при существенной антропогенной нагрузке, обусловленной мегаполисами Москвой и Санкт-Петербургом.

## Спутниковые измерения $\text{CO}_2$ в районе Москвы и Санкт-Петербурга

В июле 2014 г. Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA, США) был запущен спутник OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2 – Орбитальная углеродная обсерватория-2) [10] с надирным прибором, измеряющим отраженное солнечное излучение в ближней ИК-области спектра с большой разрешающей способностью ( $> 17000$ ), широким динамическим диапазоном ( $10^4$ ), хорошим отношением

измерения вблизи Санкт-Петербурга и Москвы (в диапазоне  $\pm 1^\circ$  широты и  $\pm 2^\circ$  долготы от центра) проводились только в течение 126 и 103 дней соответственно.

На рис. 1 приведено пространственное распределение измеренных с помощью прибора OCO-2 значений  $X_{\text{CO}_2}$  для окрестностей Москвы за весь рассматриваемый период (2014–2018 гг.). На рисунке виден антропогенный вклад Москвы. Слева от Москвы (на западе) чаще встречаются относительно низкие значения  $X_{\text{CO}_2}$  (темные точки), а справа (на востоке) можно наблюдать полосы с относительно высокими значениями  $X_{\text{CO}_2}$  (светлые точки), что отражает наличие западного переноса воздушных масс в этот период измерений. Такая картина в близкие по времени дни измерений позволяет определить содержание  $\text{CO}_2$  в фоновых и загрязненных воздушных массах.

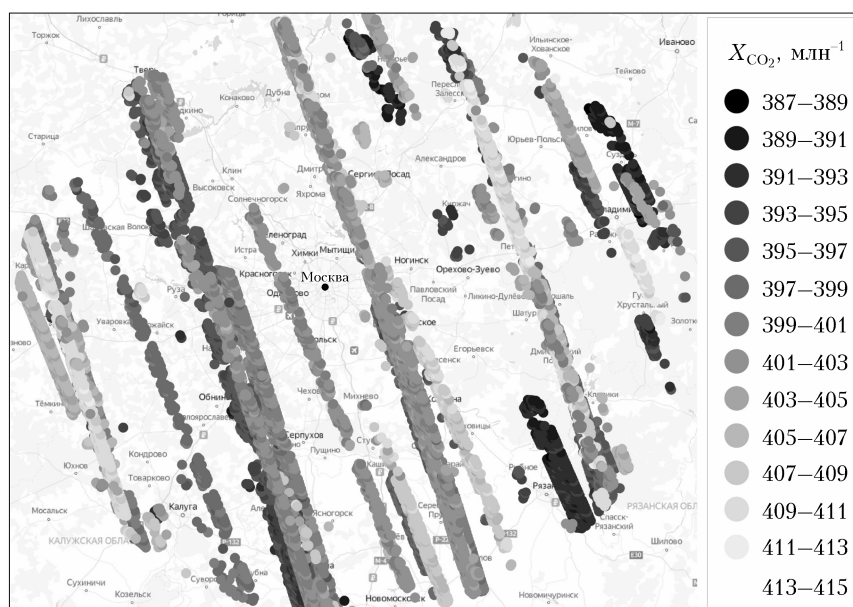


Рис. 1. Пространственное распределение  $X_{\text{CO}_2}$  в районе Москвы по данным OCO-2 за 2014–2018 гг.

сигнал-шум ( $\sim 400$ ), достаточно высокими горизонтальным разрешением ( $\sim 1,5 \times 2,5 \text{ км}^2$ ) и частотой измерений. Прибор состоит из трех спектрометров, фиксирующих отраженное и рассеянное солнечное излучение в трех полосах поглощения – в слабой ( $1,61 \text{ мкм}$ ) и сильной ( $2,06 \text{ мкм}$ ) полосах  $\text{CO}_2$  и в полосе кислорода ( $0,76 \text{ мкм}$ ). Важной особенностью спутникового прибора является измерение одновременно 8 кадров с указанным выше горизонтальным разрешением. По данным [11], средние абсолютные и среднеквадратические отличия полученных со спутника величин среднего отношения смеси углекислого газа для сухой атмосферы  $X_{\text{CO}_2}$  от наземных результатов составляют менее  $0,4$  и  $1,5 \text{ млн}^{-1}$  соответственно. Данных OCO-2 о содержании  $\text{CO}_2$  для районов Москвы и Санкт-Петербурга было относительно мало из-за большого количества облачных дней. Так, например, за четыре года функционирования OCO-2 (2014–2018 гг.)

## Оценки антропогенных эмиссий $\text{CO}_2$ мегаполисами

Определение интенсивности эмиссий различных газовых примесей на основе измеренных пространственных и временных полей их содержания в атмосфере является обратной задачей динамики атмосферы [12]. В настоящей работе эмиссия  $\text{CO}_2$  мегаполисами оценивается в боксовой модели из соотношения

$$E_{\text{CO}_2} = (U_{\text{CO}_2, \text{з}} - U_{\text{CO}_2, \text{ф}})V/L,$$

где  $E_{\text{CO}_2}$  – интенсивность эмиссии источника, в данном случае всего мегаполиса;  $U_{\text{CO}_2, \text{з}}$  и  $U_{\text{CO}_2, \text{ф}}$  – общее содержание  $\text{CO}_2$  в загрязненной и фоновой атмосфере,  $\text{г}/\text{м}^3$ ; разность  $(U_{\text{CO}_2, \text{з}} - U_{\text{CO}_2, \text{ф}})$  составляет антропогенный вклад;  $V$  – скорость ветра,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $L$  – сечение двумерного источника,  $\text{км}$ . Скорость ветра определялась из данных реанализа ERA-5

как среднее значение по области, ассоциируемой с переносом газового компонента от источника (города). При этом полагалось, что основной перенос осуществляется в пограничном слое. Сечение источника определялось приближенно, с допущением, что сложная форма города описывается параллелограммом для Санкт-Петербурга и кругом для Москвы.

При определении содержания  $\text{CO}_2$  в загрязненной атмосфере были отобраны три дня наблюдений ОСО-2 для Москвы и два дня для Санкт-Петербурга, когда влияние мегаполисов на поле значений  $X_{\text{CO}_2}$  было минимально, а измерения ОСО-2 осуществлялись максимально близко к городу – на расстоянии, не превышающем  $1^\circ$  широты и долготы от центра. Медианное значение  $X_{\text{CO}_2}$  в области переноса принималось в качестве содержания  $\text{CO}_2$  в загрязненной атмосфере ( $X_{\text{CO}_2,3}$ ). Фоновое содержание  $X_{\text{CO}_2,Ф}$  определялось путем аппроксимации медианных значений дневных измерений за 2014–2018 гг. вблизи мегаполисов модельной кривой, описывающей сезонный ход  $X_{\text{CO}_2}$  [13]. За погрешность такого метода определения фонового содержания  $\text{CO}_2$  принималось среднеквадратичное отклонение (СКО) модельного профиля от экспериментальных спутниковых данных ( $\sim 0,5 \text{ млн}^{-1}$ ). Переход от отношений смеси в столбе сухой атмосферы  $X_{\text{CO}_2,3}$  и  $X_{\text{CO}_2,Ф}$  к общему содержанию углекислого газа  $U_{\text{CO}_2,3}$  и  $U_{\text{CO}_2,Ф}$  производился по формуле, напрямую следующей из основных соотношений между различными атмосферными параметрами:

$$U_{\text{CO}_2} = 10^{-6} X_{\text{CO}_2} \mu_{\text{CO}_2} \left( \frac{10^3 P_s}{g_\phi \mu_{\text{воздуха}}} - \frac{U_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \right),$$

где  $U_{\text{CO}_2}$  – общее содержание газа в столбе атмосферы;  $\mu$  – молярная масса газа, равная  $\mu_{\text{CO}_2} = 44,01$ ,  $\mu_{\text{воздуха}} = 28,964$ ,  $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18,016$  г/моль;  $P_s$  – приземное давление по данным NCEP, мбар;  $g_\phi$  – ускорение свободного падения на рассматриваемой широте, см/с<sup>2</sup>;  $U_{\text{H}_2\text{O}}$  – общее содержание водяного пара, определенное по данным измерений Фурье-спектрометра Bruker 125HR в Петергофе [14] и метеоданным, г/см<sup>2</sup>.

Пример измерений ОСО-2 для двух дней наблюдений, 25 и 27 августа 2018 г., в окрестностях Москвы показан на рис. 2. Средняя концентрация  $\text{CO}_2$  25 августа (пунктирная линия) примерно на  $1,5 \text{ млн}^{-1}$  превышает среднюю концентрацию  $\text{CO}_2$  27 августа (сплошная линия). Отметим, что полоса измерений ОСО-2 проходила на востоке (25 августа) и на западе (27 августа) от мегаполиса. В указанные дни наблюдались очень схожие метеоусловия, в частности по направлению (ССВ) и скорости (4,6 м/с) ветра, что позволило использовать результаты наблюдений 27 августа в качестве фоновых концентраций при оценке эмиссий 25 августа.

В табл. 1 приведены параметры состояния атмосферы, использовавшиеся при анализе в настоящем исследовании. Для определения погрешности оценок эмиссии перебиралось большое количество

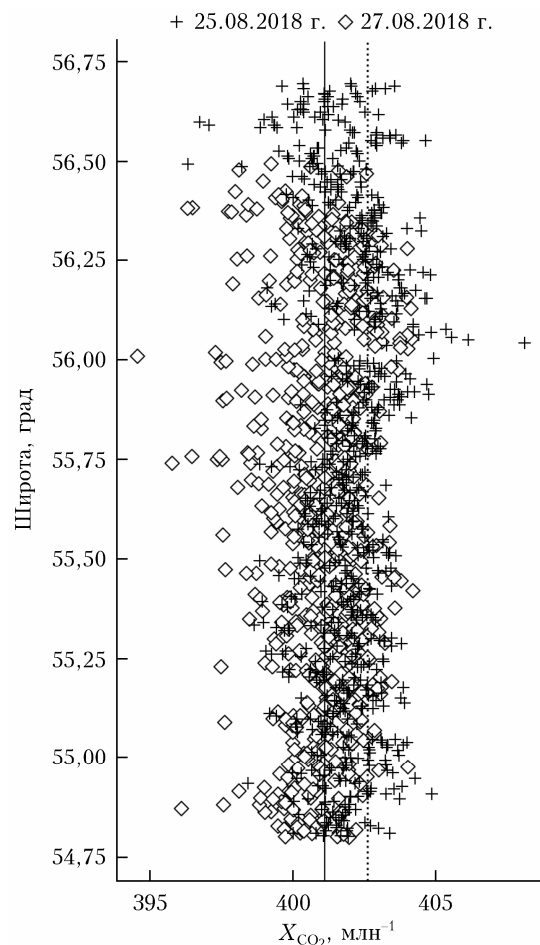


Рис. 2. Сравнения измерений  $X_{\text{CO}_2}$  на западе и востоке от Москвы

Таблица 1

Параметры состояния атмосферы для пяти дней анализа

Город	Дата	$(X_{\text{CO}_2,3} - X_{\text{CO}_2,Ф}), \text{ млн}^{-1}$	$V, \text{ м/с}$	$L, \text{ км}$
СПб	1 марта 2016 г.	0,84	3,44	49
	12 мая 2018 г.	1,83	1,76	60
Москва	26 марта 2017 г.	2,43	4,23	75
	22 июня 2018 г.	1,31	7,75	75
	25 августа 2018 г.	1,50	4,63	75

комбинаций входных параметров модели с добавлением в них случайных ошибок. При этом точность спутниковых измерений  $X_{\text{CO}_2}$  принималась равной  $0,5 \text{ млн}^{-1}$ , ошибка задания ветра определялась СКО ветра от среднего в области переноса, а погрешность определения сечения мегаполиса принималась 10%. В результате погрешность в вычислении интенсивности эмиссии составляла от 30 (при большом антропогенном вкладе) до  $\sim 90\%$  (при малом антропогенном вкладе).

## Анализ результатов

В табл. 2 приведены оценки антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  для различных городов и условий.

Отметим, что в городских условиях наиболее весомый вклад в антропогенные выбросы вносит сжигание различных типов энергоносителей для получения тепла, производства электроэнергии, транспортировки людей и грузов. К значительному выделению CO<sub>2</sub> приводят некоторые виды промышленной деятельности, такие как производство цемента и утилизация газов путем их сжигания в факелах. Все эти типы эмиссий имеют разномасштабные (суточные, сезонные и т.д.) временные вариации. Поскольку грубый переход от часовых эмиссий к суточным и годовым в настоящей работе вносит дополнительную неточность в оценки, это делается только с целью их сопоставления с данными для других мегаполисов.

Т а б л и ц а 2  
Оценки антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> для различных городов и условий

Регион, город	Интенсивность эмиссии,		Ссылки
	т/(км <sup>2</sup> · сут)	т/(км <sup>2</sup> · год)	
Петергоф, ночные измерения	16,4	6,00 · 10 <sup>3</sup>	[15]
Лондон	3,8–315	1,39 · 10 <sup>3</sup> –1,15 · 10 <sup>5</sup>	[16]
Лондон	79,8–396	2,9 · 10 <sup>4</sup> –1,4 · 10 <sup>5</sup>	[17]
Эдинбург	380	1,38 · 10 <sup>5</sup>	[16]
Лос-Анджелес	54,8	2 · 10 <sup>4</sup>	[18]
Ченнаи (Индия)	до 734	2,67 · 10 <sup>5</sup>	[19]
Берлин	~76	~2,8 · 10 <sup>4</sup>	[20]
Санкт-Петербург	74–80	2,7 · 10 <sup>4</sup> –2,9 · 10 <sup>4</sup>	Настоящая работа
Москва	123–186	4,5 · 10 <sup>4</sup> –6,8 · 10 <sup>4</sup>	Настоящая работа

Из данных табл. 2, следует, что эмиссии CO<sub>2</sub> на различных территориях очень изменчивы. Например, для Лондона, Эдинбурга и Ченнаи [16, 19] они достигали очень больших значений (315–734 т/(км<sup>2</sup> · сут) и менялись почти на два порядка. Наши оценки занимают некоторое среднее положение, но заметно превышают более ранние оценки, полученные для ночных условий в Петергофе [15]. Это может быть обусловлено значительным уменьшением антропогенного вклада от транспорта в ночное время [21], а также относительно малой территорией формирования антропогенной эмиссии (~20 км от станции наблюдений) и спецификой расположения Петергофа. Оценки эмиссий Санкт-Петербурга относительно близки к оценкам для Лос-Анджелеса [18] и Берлина [20], а результаты для Москвы близки к средним оценкам для Лондона [17].

Если учесть, что площадь Санкт-Петербурга составляет ~1400 км<sup>2</sup>, то его годовые эмиссии CO<sub>2</sub>, по нашим оценкам, находятся в диапазоне 37,8–40,6 Мт. Официальная оценка эмиссии CO<sub>2</sub>, по данным городских служб Санкт-Петербурга, в 2014 г. составляла 32,7 Мт [22]. Подобные оценки для Москвы (площадь ~2500 км<sup>2</sup>) варьировались в диа-

пазоне 112–170 Мт. В международных документах интегральные годовые эмиссии Москвы оцениваются в ~100 Мт, а по оценкам баз данных EDGAR и ODAC – 102–195 Мт.

## Заключение

На основе анализа измерений содержания углекислого газа аппаратурой спутника OCO-2 определены антропогенные эмиссии CO<sub>2</sub> для мегаполисов Москвы и Санкт-Петербурга с помощью простой боксовой модели, в которой сечение источника определялось приближенно, с допущением, что сложная форма города описывается параллелограммом для Санкт-Петербурга и кругом для Москвы. Эмиссии CO<sub>2</sub> для Санкт-Петербурга 1 марта 2016 и 12 мая 2018 г. составили 80 и 74 т/(км<sup>2</sup> · сут) соответственно. Эмиссии CO<sub>2</sub> в Москве составили 123, 179 и 186 т/(км<sup>2</sup> · сут) 25 августа и 22 июня 2018 и 26 марта 2017 г. Проведены сопоставления полученных результатов с оценками, сделанными для других мегаполисов. Для Санкт-Петербурга они близки к значениям Лос-Анджелеса и Берлина, а для Москвы – к средним значениям Лондона. Точность рассмотренного метода во многом определяется точностью спутниковых измерений в зоне загрязнения и погрешностью методики определения фоновых содержаний CO<sub>2</sub>. При малом антропогенном вкладе (~0,5 млн<sup>-1</sup>) погрешности оценок эмиссий близки к 100%, а при большом (~1,5–2 млн<sup>-1</sup>) погрешность определения составляет ~30%.

1. Mori K., Hirahara T., Ikegami M., Conway T.J. Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases. GAW Report N 184. WMO, 2009. 29 p.
2. Matsunaga T., Maksyutov S. (eds.). A Guidebook on the Use of Satellite Greenhouse Gases Observation Data to Evaluate and Improve Greenhouse Gas Emission Inventories. Satellite Observation Center, National Institute for Environmental Studies, Japan, 2018. 129 p.
3. Wu L., Broquet G., Ciais P., Bellassen V., Vogel F., Chevallier F., Xueref-Remy I., Wang Y. What would dense atmospheric observation networks bring to the quantification of city CO<sub>2</sub> emissions? // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 12. P. 7743–7771.
4. Hopkins F.M., Ehleringer J.R., Bush S.E., Duren R.M., Miller C.E., Lai C.-T., Hsu Y.-K., Carranza V., Randleson 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, N 9. P. 408–425.
5. Palmer P.I. Quantifying sources and sinks of trace gases using space-borne measurements: Current and future science // Phil. Trans. R. Soc. A. 2008. V. 366, N 1885. P. 4509–4528.
6. Miller C.E., Crisp D., DeCola P.L., Olsen S.C., Randleson J.T., Michalak A.M., Alkhaled A., Rayner P., Jacob D.J., Suntharalingam P., Jones D.B.A., Denning A.S., Nicholls M.E., Doney S.C., Pawson S., Boesch H., Connor B.J., Fung I.Y., O'Brien D., Salawitch R.J., Sander S.P., Sen B., Tans P., Toon G.C., Wennberg P.O., Wofsy S.C., Yung Y.L., Law R.M. Precision requirements for space-based X<sub>CO<sub>2</sub></sub> data //

- J. Geophys. Res. 2007. V. 112, N D10314. DOI: 10.1029/2006JD007659.
7. Deng F., Jones D.B.A., Henze D.K., Bousserez N., Bowman K.W., Fisher J.B., Nassar R., O'Dell C., Wunch D., Wennberg P.O., Kort E.A., Wofsy S.C., Blumenstock T., Deutscher N.M., Griffith D.W.T., Hase F., Heikkinen P., Sherlock V., Strong K., Sussmann R., Warneke T. Inferring regional sources and sinks of atmospheric CO<sub>2</sub> from GOSAT X<sub>CO<sub>2</sub></sub> data // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 7. P. 3703–3727.
  8. Feng L., Palmer P.I., Bösch H., Parker R.J., Webb A.J., Correia C.S.C., Deutscher N.M., Domingues L.G., Feist D.G., Gatti L.V., Gloor E., Hase F., Kivi R., Liu Y., Miller J.B., Morino I., Sussmann R., Strong K., Uchino O., Wang J., Zahn A. Consistent regional fluxes of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> inferred from GOSAT proxy X<sub>CH<sub>4</sub></sub>:X<sub>CO<sub>2</sub></sub> retrievals, 2010–2014 // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 7. P. 4781–4797.
  9. Nassar R., Hill T.G., McLinden C.A., Wunch D., Jones D.B.A., Crisp D. Quantifying CO<sub>2</sub> emissions from individual power plants from space // Geoph. Res. Lett. 2017. V. 44, N 19. P. 10.045–10.053.
  10. Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M., Rosenberg R., Blavier J.-F., Crisp D., O'Dell C.W., Osterman G.B., Roehl C., Wennberg P.O., Wunch D. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): Spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8, N 1. P. 301–313.
  11. 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.V.T., Deutscher N.M., Velasco V.A., Notholt J., Warneke T., Petri C., Martine De Maziere, 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 Sh., Dubey M.K., Parker H.A., Sepulveda E., Garcia O.E., Te Y., Jeseck P., Gunson M.R., Crisp D., Eldering A. Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) X<sub>CO<sub>2</sub></sub> measurements with TCCON // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10, N 6. P. 2209–2238.
  12. Enting I.G. Inverse problems in Atmospheric Constituent Transport. New York: Cambridge University Press, 2002. 410 p.
  13. Barthlott S., Schneider M., Hase F., Wiegeler A., Christner E., González Y., Blumenstock T., Dohe S., Garcia O.E., Sepulveda 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., Velasco V.A., Smale D., Robinson J., Kivi R., Heikkinen P., Raffalski U. Using X<sub>CO<sub>2</sub></sub> retrievals for assessing the long-term consistency of NDACC/FTIR data sets // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8, N 3. P. 1555–1573.
  14. Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Kostov V.S., Ionov D.V., Kalinnikov V.V., Makarova M.V., Poberovskiy A.V., Zaitsev N.A., Imhasin H.H., Polyakov A.V., Schneider M., Hase F., Barthlott S., Blumenstock T. Quality assessment of integrated water vapour measurements at St. Petersburg site, Russia: FTIR vs. MW and GPS techniques // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10, N 11. P. 4521–4536.
  15. Макарова М.В., Арабаджян Д.К., Фока С.Ч., Парамонова Н.Н., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М., Панкратова Н.В., Ракитин В.С. Оценка ночных эмиссий углеродосодержащих газов в пригородах Санкт-Петербурга // Метеорол. и гидрол. 2018. № 7. С. 36–44.
  16. O'Shea S., Allen G., Fleming Z., Bauguitte S., Percival J.C., Gallagher M., Lee J., Helfter C., Nemitz E. Area fluxes of carbon dioxide, methane, and carbon monoxide derived from airborne measurements around Greater London: A case study during summer 2012 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2014. V. 119, N 8. P. 4940–4952.
  17. Font A., Grimmond C.S., Kotthaus S., Morgui J.A., Stockdale C., O'Connor E., Priestman M., Barratt B. Daytime CO<sub>2</sub> urban surface fluxes from airborne measurements, eddy-covariance observations and emissions inventory in Greater London // Environ. Pollut. 2015. V. 196, N 1. P. 98–106.
  18. Kort E.A., Frankenberg C., Miller C.E., Oda T. Space-based observations of megacity carbon dioxide // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, N 17. P. L17806.
  19. Kumar M.K., Nagendra S.M. Quantification of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions in a tropical urban environment // Atmos. Environ. 2016. V. 125, N 1. P. 272–282.
  20. Hase F., Frey M., Blumenstock T., Groß J., Kiel M., Kohlhepp R., Mengistu Tsidu G., Schäfer K., Sha K.M., Orphal J. Use of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions of the major city Berlin // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8, N 7. P. 305–3068.
  21. Newman S., Jeong S., Fischer M.L., Xu X., Haman C.L., Lefler B., Alvarez S., Rappenglueck B., Kort E.A., Andrews A.E., Peischl J., Gurney K.R., Miller C.E., Yung Y.L. Diurnal tracking of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions in the Los Angeles basin megacity during spring 2010 // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 8. P. 4359–4372.
  22. Серебрицкий И.А. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2017 году. СПб.: Сезам-принт, 2018. 158 с.

*Yu.M. Timofeev, I.A. Berezin, Ya.A. Virolainen, A.V. Poberovskii, M.V. Makarova, A.V. Polyakov.*  
**Estimates of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions for Moscow and St. Petersburg based on OCO-2 satellite measurements.**

The rates of CO<sub>2</sub> anthropogenic emissions are estimated for Saint Petersburg and Moscow megacities based on satellite CO<sub>2</sub> measurements by OCO-2 instrument. The CO<sub>2</sub> emission rates for Saint Petersburg amount to 80 and 74 t/km<sup>2</sup> per day on March 1, 2016, and May 12, 2018, respectively. The CO<sub>2</sub> emission rate for Moscow is estimated as 123, 179, and 186 t/km<sup>2</sup> per day for August 25, 2018, June 22, 2018, and March 26, 2017, respectively. The comparison of our results with the estimates for other megacities has shown that the emission estimates for Saint Petersburg are close to those for Los Angeles and Berlin, and estimates for Moscow are close to those for London. The estimation errors are mainly caused by the anthropogenic contribution, which varies from 30% to ~90%.