———— ГЕОЭКОЛОГИЯ ———

УЛК 551.588.74

ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ ЭМИССИЙ CO₂ МЕГАПОЛИСА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2020 г. Ю. М. Тимофеев^{1,*}, Г. М. Неробелов¹, Я. А. Виролайнен¹, А. В. Поберовский ¹, С. Ч. Фока¹

Представлено академиком РАН И.И. Моховым 16.06.2020 г. Поступило 16.06.2020 г. После доработки 17.06.2020 г. Принято к публикации 18.06.2020 г.

Приведены оценки антропогенных эмиссий CO_2 мегаполиса Санкт-Петербурга на $1~\rm km^2$ и на всю площадь города (интегральные), полученные на основе наземных измерений содержаний CO_2 в районе города. При помощи сопоставлений измеренных и рассчитанных (база данных ODIAC) антропогенных вкладов CO_2 города решалась обратная задача по определению эмиссий. Использовались два подхода — в первом применялся томографический метод и были определены антропогенные эмиссии трех районов города на $1~\rm km^2$, во втором — все доступные измерения использовались для нахождения среднего корректирующего множителя R и оценок интегральных эмиссий всего мегаполиса и центральной части. Эмиссии на $1~\rm km^2$ для юга города находятся в диапазоне 32.7-48.3, для центра — 69.0-97.5 и севера — $78.2~\rm kT/km^2$ год. Интегральные эмиссии CO_2 центральной части и всего мегаполиса составляют $39.8~\rm u$ $65.3~\rm MT/год$ соответственно. Погрешности оценок — 20-40%. Новые данные антропогенных эмиссий CO_2 Санкт-Петербурга превышают ранние оценки примерно в два раза.

Ключевые слова: антропогенные выбросы CO_2 , Санкт-Петербург, инвентаризация, измерение CO_2 , ODIAC, дифференциальный метод

DOI: 10.31857/S2686739720090182

Мегаполисы нашей планеты в последние десятилетия в существенной степени (около 70%) определяют антропогенные эмиссии СО₂ [1]. Это обстоятельство делает чрезвычайно актуальным исследования интенсивности антропогенных эмиссий СО₂ в различных городах России. В СССР и России широко использовался и используется метод инвентаризации, основанный на суммировании различных источников эмиссий (объемы сжигаемого топлива, электростанции, транспорт, заводы и т.д.). Погрешности этих методов сильно варьируются (см., например, работу [2]) от 5 до 50% и более, в зависимости от уровня развития страны, качества производимой инвентаризации и требуемого пространственного разрешения. С повышением пространственного разрешения оценок эмиссий погрешности метода инвентаризации быстро растут. В связи с этим, а также необходимостью независимого контроля выполнения международных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов, в настоя-

Для научных и прикладных исследований очень важны оценки суммарных (интегральных) эмиссий парниковых газов мегаполисов. Оценки

щее время активно разрабатываются и используются различные экспериментальные методы оценок эмиссий, в частности дифференциальный метод оценок антропогенных вкладов мегаполисов (см., например, [3]). Этот метод основан на измерениях локальных приземных концентраций или общего содержания в фоновой и загрязненной атмосфере города при использовании двух или более калиброванных приборов (в наветренной и подветренной частях города). Такие измерения проводились в марте-апреле 2019 г. для территории Санкт-Петербурга в рамках программы Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME). В работе [4] описаны результаты измерений ЕММЕ, а также эмиссии СО2, СН4, NO2 и СО на единицу площади 1 км², рассчитанные по измерениям при помощи дифференциального метода. Преимуществом такого подхода является высокая точность измерений антропогенного вклада. Например, случайные погрешности его измерений в Санкт-Петербурге были близки к 0.10 ррт (0.025%) для СО₂.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^{*}E-mail: y.timofeev@spbu.ru

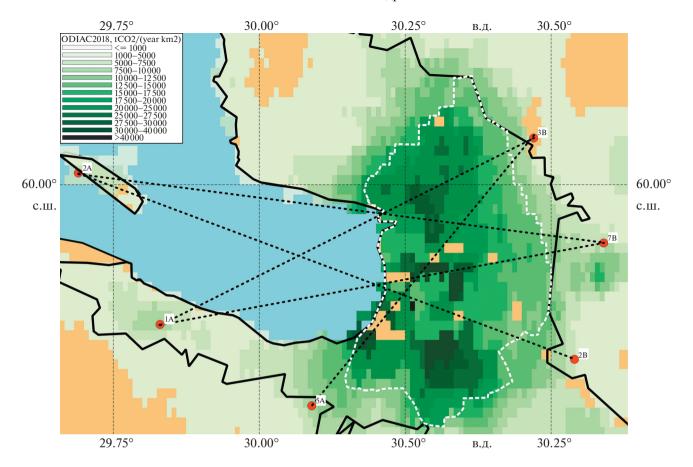


Рис. 1. Антропогенные эмиссии CO_2 (база данных ODIAC за 2018 г.) в Санкт-Петербурге и трассы для оценок эмиссий на 1 км 2 и на всю площадь города.

эмиссий CO_2 Санкт-Петербурга на 1 км 2 и на всю площадь города (интегральные) на основе измерений [4] приведены в сообщении.

На рис. 1 изображена большая часть территории Санкт-Петербурга (черный сплошной контур) с выделенной центральной частью (белая пунктирная линия) и с данными об антропогенных эмиссиях СО2 из базы данных с высоким пространственным разрешением (1 км²) ODIAC (Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂) за 2018 г. [5]. Также на рис. 1 указаны положения двух фурье-спектрометров "Bruker" EM27/SUN в разные дни измерений, которые использовались для измерений средних отношений смеси ХСО₂ в фоновой и загрязненной атмосфере. Стоит заметить, что данные ODIAC получены при помощи инвентаризационного подхода. Прямые линии соединяют точки измерений СО₂ по ветру (фоновая атмосфера) и против ветра (загрязненная атмосфера), что позволило непосредственно измерить антропогенный вклад на каждой из использованных трасс. Расчетные значения антропогенного вклада проводились интегрированием вкладов по данным ODIAC на указанных трассах

с учетом информации о направлении и скорости ветра. Отметим, что в данной работе анализируются 7 дней измерений и используют 5 различных трасс измерений.

Как следует из рис. 1, антропогенные эмиссии CO_2 существенно (на порядки) меняются на территории мегаполиса. Поэтому антропогенное приращение CO_2 существенно меняется (см. табл. 1) в зависимости от используемой трассы. Так, экспериментально измеренные приращения CO_2 меняются от 0.7 до 4.24×10^{19} мол $\mathrm{CO}_2/\mathrm{cm}^2$, т.е. более чем в 6 раз в период наших измерений. Большой диапазон изменчивости экспериментальных приращений CO_2 обусловлен большими пространственными вариациями антропогенных эмиссий на территории города и изменениями метеорологических условий (прежде всего направления и скорости ветра), а также погрешностями измерений и используемой методики оценок.

Данные об антропогенных вкладах в XCO_2 для различных трасс и, следовательно, об эмиссиях различных районов Санкт-Петербурга позволяют использовать томографический подход для полу-

•	*				
Дата (2019)	EMME (2019)	ODIAC (2018)	R	Трассы	Эмиссии на 1 км2
21 марта	1.13	0.38	2.97	A1 – B7	69.0 центр
27 марта	1.67	1.8	0.93	A2 - B2	43.7 юг
1 апреля	0.70	0.92	0.76	A2 - B2	32.7 юг
3 апреля	2.05	1.1	1.87	A1 - B3	78.2 север
4 апреля	2.14	0.94	2.28	A5 - B3	68.5 средняя
6 апреля	4.24	1.21	3.5	B7 –A2	97.5 центр
24 апреля	2.19	1.12	1.96	A2 - B2	48.3 юг

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные оценки антропогенного вклада в содержание CO_2 и эмиссий на 1 км^2 для трех областей города — север, центр и юг

Примечание. ЕММЕ — измерения приращения CO_2 , ODIAC — расчетные приращения CO_2 (оба — 10^{19} мол/см²), R — корректирующий параметр, эмиссии на 1 км^2 для различных районов (кт/км² год).

чения средних эмиссий отдельных районов города на 1 км², в частности, северных, центральных и южных районов мегаполиса.

Как следует из табл. 1, эмиссии на 1 км^2 для юга города находятся в диапазоне 32.7-48.3, для центра -69.0-97.5 и севера -78.2 кт/км² год.

Определение интегральных эмиссий мегаполиса было осуществлено на основе базы данных ODIAC, определения отношений (R) экспериментальных и расчетных приращений СО2 для каждого района и среднего корректирующего множителя. Коррекционный множитель оказался равным 1.935. Оценки погрешностей для полученных данных показывают, что случайные погрешности составляют ~30% и обусловлены, в первую очередь, погрешностями задания скорости и направления ветра, а также используемой боксовой модели и качеством априорной информации. Учитывая, что оценка интегральной эмиссии СО2 на основе оригинальных значений базы данных ODIAC составляет 33.8 Мт/год, наши результаты, основанные на данных измерений [4], результатах ODIAC и множителе R, показали, что интегральные эмиссии для всего мегаполиса (1417 км²) составляют $65.4 \pm 20 \text{ Mт/год.}$

В табл. 2 приведены сравнения полученных ранее оценок интегральных эмиссий Санкт-Петербурга, а также результаты ЕММЕ и результаты текущей работы. Данные ОСО-2 получены с помощью анализа спутниковых измерений [6]. Данные ODIAC — на основе базы данных [5]. Оценка базы данных CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) приведена с учетом относительного вклада Санкт-Петербурга в прогнозы суммарных антропогенных эмиссий CO_2 , соответствующего ячейке этой базы ($\sim 200 \times 200 \text{ км}^2$). Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что разные методы оценок антропогенных эмиссий дают заметно разные результаты. Так, данные, полу-

ченные при помощи инвентаризационного подхода (данные правительства Санкт-Петербурга [7] и оригинальные значения базы ODIAC) и спутниковых измерений ОСО-2 дают примерно в 2 раза меньшие значения антропогенных эмиссий СО2 мегаполиса по сравнению с нашими оценками. Отличия в суммарных антропогенных эмиссиях СО2 могут быть обусловлены использованием в разных работах различной площади мегаполиса при получении суммарных значений. Например, наши оценки эмиссии для центральной части города (394 км²), которая является наиболее загруженной по данным базы ODIAC, дают существенно меньшее значение, которое составляет 39.9 ± 12 Мт/год. Другой причиной систематических отличий могут быть временные и пространственные вариации эмиссий на 1 км² на территории мегаполиса и практически случайный характер траекторных измерений. В связи с этим важное значение имеют валидационные комплексные программы наземных, самолетных и спутниковых измерений эмиссий относительно

Таблица 2. Интегральные антропогенные эмиссии ${\rm CO_2}$ в Санкт-Петербурге

Источник данных	Эмиссии в Мт/год	
Настоящая работа, весь город	65.4 (2019)	
Настоящая работа, центральная	39.9 (2019)	
часть		
ODIAC, город	33.7 (2018)	
Оценки CAMS, город	66.8 (2018)	
OCO-2	39.2 (2016. 2018)	
Инвентаризация (правительство Санкт-Петербурга)	32.7 (2015)	

высокого пространственного разрешения и охвата территорий мегаполисов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- World Energy Outlook 2008, IEA, Paris. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2008.
- 2. Andres R.J., Boden T.A., Bréon, et al. A Synthesis of Carbon Dioxide Emissions from Fossil-Fuel Combustion // Biogeosciences. 2012. № 9. P. 1845—1871. https://doi.org/10.5194/bg-9-1845-2012
- 3. Hase F, Frey M., Blumenstock T., et al. Application of Portable FTIR Spectrometers for Detecting Greenhouse Gas Emissions of the Major City Berlin // Atmos. Meas. Tech. 2015. № 8. P. 3059-3068. https://doi.org/10.5194/amt-8-3059-2015
- 4. Makarova M.V., Hase F., Ionov D.V., et al. Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): An Over-

- view and First Results of the St. Petersburg Megacity Campaign-2019 // Atmos. Meas. Tech. Discuss. https://doi.org/10.5194/amt-2020-87
- 5. *Oda T., Maksyutov S.* A Very High-resolution (1 km × 1 km) Global Fossil Fuel CO₂ Emission Inventory Derived Using a Point Source Database and Satellite Observations of Nighttime Lights // Atmos. Chem. Phys. 2011. № 11. P. 543–556. https://doi.org/10.5194/acp-11-543-2011
- 6. Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А. и др. Оценки антропогенных эмиссий СО₂ для Москвы и Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений ОСО-2. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 4. С. 261—265.
- 7. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2017 году, Правительство Санкт-Петербурга, 2018. Серебрицкий И.А., (ред.). 212 с. https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2018/06/29/Doklad EKOLOGIA2018

ESTIMATES OF CO₂ ANTHROPOGENIC EMISSIONS FROM SAINT-PETERSBURG MEGACITY

Y. M. Timofeyev^{a,#}, G. M. Nerobelov^a, Y. A. Virolainen^a, A. V. Poberovskii^a, and S. C. Foka^a

^a Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation [#]E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Presented by Academician of the RAS I.I. Mokhov June 16, 2020

Estimates of CO_2 anthropogenic emissions of St. Petersburg megacity per 1 km² and per whole city's area (integral emissions) which are based on the ground-based measurements of CO_2 content on the territory of the city are presented in the study. To obtain emissions, inverse problem was solved using the results of comparison between measured and calculated (ODIAC dataset) city's anthropogenic contribution to CO_2 content. Two approaches were used. In the first a tomography method was implemented to estimate anthropogenic emissions of three city's regions per 1 km². In the second all available measurements were used to derive average correcting factor R and to obtain integral CO_2 emissions of the megacity and its central part. The emissions per 1 km² for south of the city are in range 32.7–48.3, for center -69.0-97.5, for north -78.2 kt/km². The integral CO_2 emissions from the territories of the megacity and its central part constitute 65.3 and 39.8 Mt/year respectively. Inaccuracies of the estimates are 20-40%. The estimates of the St. Petersburg CO_2 anthropogenic emissions are higher approximately in 2 times than earlier results.

 $\textit{Keywords:} \ CO_2 \ anthropogenic \ emissions, \ St. \ Petersburg, \ inventory, \ CO_2 \ measurements, \ ODIAC, \ differential \ method$