

УДК 551.588.74

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ЭМИССИЙ CO₂ ГОРОДА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2022 г. Ю. М. Тимофеев^{а, *}, Г. М. Неробелов^{а, b, c, **}, А. В. Поберовский^а

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

^bНаучно-исследовательский центр экологической безопасности РАН,
ул. Корпусная 18, Санкт-Петербург, 187110 Россия

^сРоссийский государственный гидрометеорологический университет,
Малоохтинский проспект 98, Санкт-Петербург, 195196 Россия

*e-mail: y.timofeev@spbu.ru

**e-mail: akulische95@mail.ru

Поступила в редакцию 14.12.2021 г.

После доработки 22.01.2022 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

Рост содержания парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O и т.д.) в атмосфере Земли меняет радиационный баланс и приводит к изменениям климата планеты. Важную роль в этом процессе играют антропогенные эмиссии углекислого газа (CO₂) от мегаполисов, вклад которых составляет примерно 70% от всех антропогенных выбросов. В работе определены антропогенные эмиссии CO₂ мегаполиса Санкт-Петербурга на основе данных экспериментальной программы ЕММЕ 2019 г. Использовалась новая методика решения обратной задачи, основанная на априорных данных и применении поправочных множителей только в районах города, охваченных наблюдениями. Новые оценки интегральных антропогенных эмиссий CO₂ Санкт-Петербурга находятся в диапазоне 52–72 Мт CO₂/год, существенно превышающем инвентаризационные оценки (~30 Мт CO₂/год). Однако, минимальное значение диапазона (52 Мт CO₂/год) меньше ранее полученных нами эмиссий по данным ЕММЕ 2019 года примерно на 21% (65 Мт CO₂/год).

Ключевые слова: эмиссии CO₂ Санкт-Петербурга, дифференциальный метод, наземные спектроскопические измерения, погрешности, ODIAС, STILT

DOI: 10.31857/S0002351522030105

1. ВВЕДЕНИЕ

Рост содержания в атмосфере Земли парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O и т.д.) меняет радиационный баланс и приводит к изменениям климата планеты [1]. Важную роль в этом процессе играют антропогенные эмиссии углекислого газа (CO₂) от мегаполисов, вклад которых составляет примерно 70% от всех антропогенных выбросов [2]. Для контроля за антропогенными эмиссиями CO₂ уже длительное время во многих странах используется инвентаризационный метод. Он основан на расчете выбросов от различных источников согласно данным об антропогенной активности (например, о количестве потребляемого ископаемого топлива). Точность этого метода существенно определяется наличием подобной информации, ее пространственным и временным распределением, а также качеством самой информации и ее анализа [3]. Оценки эмиссий подобным методом имеют погрешности от 3–5% (США), 15–20% (Китай) и до

50% и более для слаборазвитых стран [4] и не всегда удовлетворяют потребности пользователей.

В последнее время во многих развитых странах были приняты обязательства по сокращению антропогенных эмиссий CO₂ и других газов. В связи с этим создаются различные методы и системы по независимому контролю за выполнением взятых обязательств [5, 6]. Для независимых оценок эмиссий используются измерения содержания CO₂, (локальные и дистанционные) проводимые с земной и водной поверхностей, с вышек, при помощи самолетов, аэростатов и искусственных спутников Земли.

Разные методы по оценке эмиссий CO₂ имеют свои преимущества и недостатки, анализ которых проведен, например, в работе [6]. Оценки вклада антропогенных и естественных эмиссий парниковых газов в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата при различных

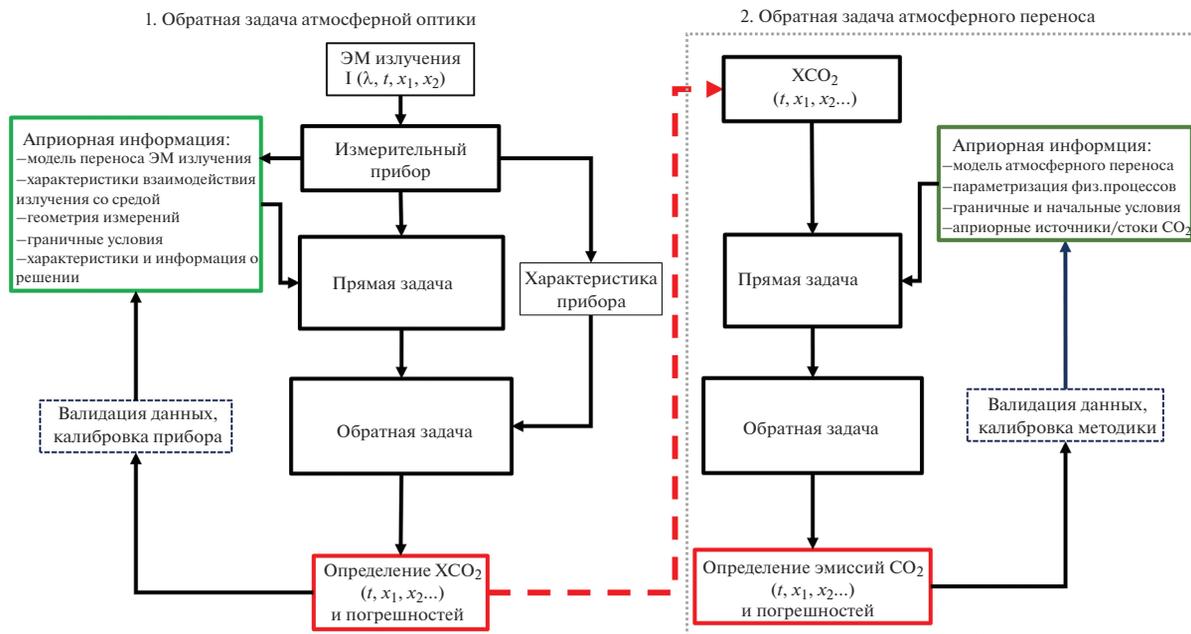


Рис. 1. Схема последовательного решения двух обратных задач – атмосферной оптики и атмосферного переноса; ЭМ – электромагнитное излучение, XCO₂ – среднее отношение смеси CO₂ в атмосферном столбе, λ – длина ЭМ волны, t – время измерения, x₁ и x₂ – координаты измерения.

сценариях антропогенных выбросов в XXI веке приведены в работе [7].

2. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭМИССИЙ CO₂

Экспериментальные дистанционные спектроскопические наземные и спутниковые методы определения эмиссий являются по сути последовательным решением двух обратных задач – атмосферной оптики и атмосферного переноса (рис. 1). На первом этапе по измерениям разных характеристик излучения (солнечного, теплового и т.д.) в полосах поглощения парниковых газов решается обратная задача атмосферной оптики и определяются пространственно-временные вариации содержания, например, CO₂. На втором этапе с использованием этой информации решается вторая обратная задача, но уже атмосферного переноса [8] – определяются эмиссии различных газов с исследуемой территории.

Решение обратных задач имеет определенную специфику, состоящую в (1) необходимости привлечения априорной информации об искомых решениях и оценках ее достоверности; (2) существенном влиянии на решение качества используемых численных моделей атмосферной оптики и атмосферного переноса, а также априорной информации; (3) требованиях высокой точности решений, т.к., например, полезный сигнал об эмиссиях часто очень мал. Например, антропогенное

влияние на содержание CO₂ составляет в среднем 0.1–4.0 млн⁻¹, т.е. менее 1% от среднего уровня содержания газа. Под антропогенным влиянием мы понимаем воздействие человеческой деятельности на общее содержание CO₂, измеренное в конкретный момент времени (или небольшой период – период проведения измерений) для определенного объекта (например, для некоторого района Санкт-Петербурга). Различие обратных задач атмосферной оптики и переноса состоит в том, что вторая задача существенно более сложная. Ее сложность определяется численной моделью (прямой оператор), описывающей непростой комплекс физических и химических процессов, формирующих пространственно-временную динамику содержания исследуемого газа. В этих моделях кроме фундаментальных законов динамики и термодинамики используются различные параметризации, метеорологические и химические граничные и начальные условия, разные априорные источники газов и т.д. Прямой оператор обратных задач атмосферной оптики (дистанционных методов измерений) – радиационные модели – последние десятилетия непрерывно совершенствовался с помощью лабораторных и натуральных измерений, а также постоянно уточняемых и развиваемых численных методов расчета параметров тонкой структуры полос поглощения атмосферных газов, разработки совершенных радиационных кодов в теории переноса излучения и т.д. В свою очередь прямой оператор в обратных задачах атмосфер-

ного переноса также совершенствовался, но не в такой степени из-за сложности и трудности организации его валидации. В качестве примера отметим, что современные радиационные коды в тепловой области спектра имеют погрешности менее 1 градуса яркостной температуры, а ее естественные вариации достигают десятков градусов. Сложности обратной задачи атмосферного переноса и качество соответствующих современных численных моделей наглядно проявляется в значительной зависимости результатов определения эмиссий парниковых газов от используемой модели. Так, например, в работах [9, 10] показано, что использование разных численных моделей атмосферного переноса приводит к вариациям оценок эмиссий, достигающих 50% и более.

Особое значение для оценок антропогенных эмиссий CO_2 в последние десятилетия имеют спутниковые методы, прежде всего, из-за запуска и успешной работы различной спутниковой аппаратуры – приборов SCIMACHY, GOSAT, OCO-2 и т.д. [11]. При этом важной особенностью таких измерений является необходимость их регулярной калибровки. В частности, решение первой обратной задачи атмосферной оптики сопровождается проведением специальных наземных и самолетных измерений для калибровки и валидации спутниковых данных о содержании газов. Для этого создана международная сеть наземных измерений TCCON (Total Carbon Column Observing Network) [12]. Однако, необходима также и валидация спутниковых определений эмиссий с использованием, например, независимых высокоточных наземных измерений.

В последнее время для исследований антропогенных эмиссий CO_2 городов и промышленных объектов используется наземный дифференциальный спектроскопический (ДС) ИК метод, основанный на одновременных измерениях общего содержания газа несколькими взаимокалиброванными приборами [13–17]. Например, в Мюнхене создана система оперативного контроля антропогенных выбросов, основанная на ДС методе [18].

В методике ДС осуществляются параллельные измерения содержания газа в наветренной (фоновый воздух) и подветренной (загрязненный воздух) частях исследуемого города. Разность измерений, проводимых параллельно в загрязненном и фоновом воздухе, дает информацию об антропогенном вкладе города в содержание газа. Преимущества данного подхода связаны с высокой точностью измерений городского антропогенного вклада на основе использования взаимокалиброванных приборов. К недостаткам можно отнести ограничение измерений дневным временем и наличием облачности (при использовании солнечного излучения), а также относительно высокую стоимость мобильных ИК Фурье-спек-

трометров. Тем не менее дифференциальный метод измерений эмиссий может рассматриваться как перспективный наземный способ для валидации спутниковых методов определения антропогенных эмиссий CO_2 .

3. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ CO_2 В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ В 2019 ГОДУ

В 2019–2020 гг. в Санкт-Петербурге коллективом ученых СПбГУ, ГГО, Karlsruhe Institute of Technology (Карлсруэ, Германия) и University of Bremen (Бремен, Германия) была проведена экспериментальная программа ЕММЕ (Emission Monitoring Mobile Experiment) по реализации ДС ИК метода и определения эмиссий ряда газов с территории города [19].

В экспериментах ЕММЕ в 2019 году в Санкт-Петербурге использовалось два прибора и 11 дней измерений. Для определения средних удельных эмиссий были рассмотрены варианты 9 (21, 27 марта и 1, 3, 4, 6, 16, 24 и 25 апреля) и 4 дней (21, 27 марта и 3, 4 апреля) наиболее качественных измерений (выбор дней обоснован в исследовании [19]). При определении интегральных эмиссий Санкт-Петербурга (т.е. эмиссий со всей площади мегаполиса) в работе [20] использовались 7 дней измерений, в работе [21] – 8. При этом в экспериментах ЕММЕ одна из траекторий (одна пара точек наблюдений) повторялась трижды. Таким образом при анализе измерений [20] использовалось не более 5-ти заметно отличающихся геометрий наблюдений на территории мегаполиса.

Согласно ДС методу требуется определить USCO_2 – измерения общего содержания (ОС) CO_2 в фоновом и загрязненном воздухе исследуемого города. Значения USCO_2 рассчитываются на основе интерпретации измерений спектров солнечного излучения с помощью различного программного обеспечения (PROFFIT, SFIT, COCCON и т.д.). Далее рассчитывается разность между ОС CO_2 в двух позициях измерений. Найденная разность между двумя измерениями может быть охарактеризована, как средний антропогенный вклад города в содержание CO_2 (ΔUSCO_2), обусловленный эмиссиями на конкретном пути перемещения воздушной массы. Считая, что основной вклад в городские антропогенные эмиссии CO_2 вносят стационарные источники (например, сеть теплоэлектроцентралей), можно предположить, что ΔUSCO_2 , полученные в парных точках измерений, расположенных вокруг исследуемого города, зависят от эмиссий CO_2 с площадей распространения воздушных масс (далее будем называть такие площади “трассами”). Т.е. ΔUSCO_2 характеризуют эмиссии CO_2 с определенных площадей исследуемой территории. Измеренные ΔUSCO_2 зависят от

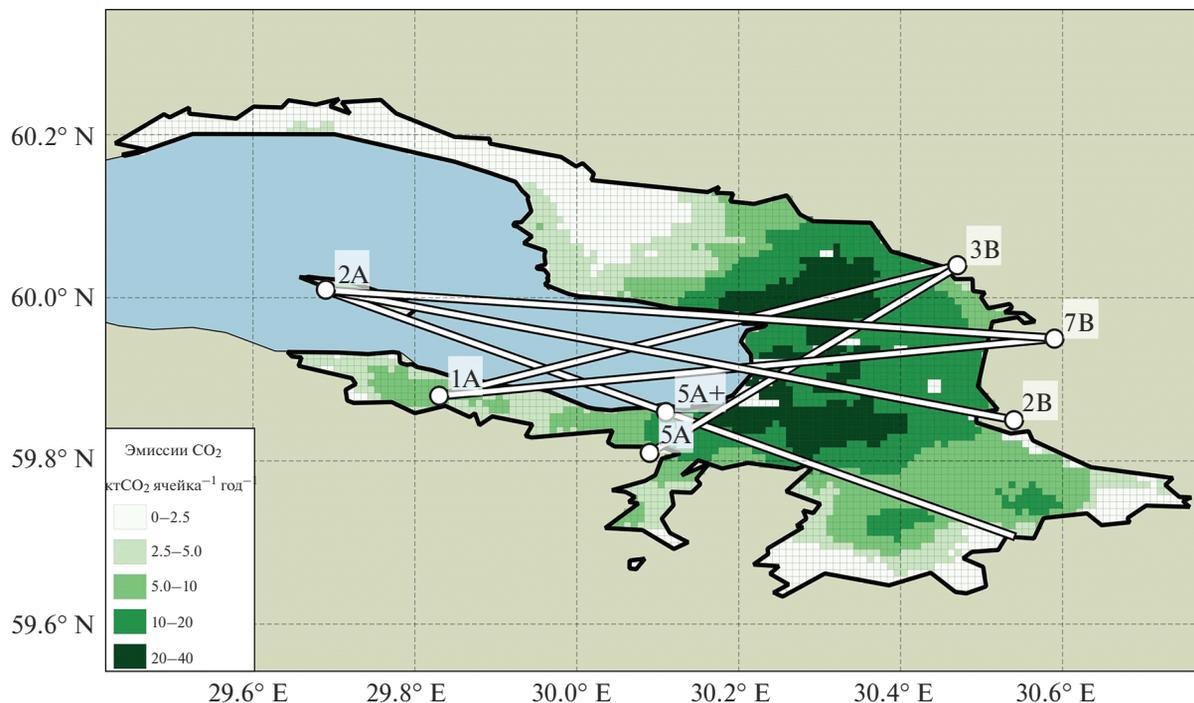


Рис. 2. Антропогенные эмиссии CO₂ (ODIAC 2018) в Санкт-Петербурге, позиции измерений ЕММЕ 2019 г. и упрощенные траектории движения воздушных масс.

величины локальных эмиссий $e(t, x, y)$, скорости и направления ветра и длины пути перемещения воздушной массы. В первом приближении для определения связи между измеренными ΔUCO_2 и удельными эмиссиями города использовалась простая боксовая модель. Измеренные средние удельные эмиссии CO₂ сравнивались с расчетами на основе априорной информации об антропогенных эмиссиях [22], затем определялись поправочные множители, позволяющие согласовать расчетные и экспериментальные значения. Данный подход, совместно с боксовой моделью, использовался в работе [20] для оценки интегральных эмиссий Санкт-Петербурга.

При оценках интегральных эмиссий описанным методом объем измерений и используемые трассы, характеризующие движение воздушных масс, должны покрывать практически всю территорию исследуемого мегаполиса. Для этого целесообразно использовать достаточное количество приборов и длительные периоды измерений. Например, при определении антропогенных эмиссий городов Берлина и Парижа ДС методом анализировались измерения 5 приборов, установленных равномерно вокруг изучаемого мегаполиса, за 2–3 нед. [16, 23]. В Мюнхене оперативная система контроля эмиссий парниковых газов также использует 5 приборов [18].

Важно отметить, что экспериментальные оценки антропогенных эмиссий CO₂ в работах [20, 21] более чем вдвое превышали инвентаризационные

оценки интегральных эмиссий (65–76 Мт/год по сравнению с 30 Мт/год). Однако, в обоих исследованиях интегральных эмиссий не был учтен тот факт, что измерения программы ЕММЕ в 2019 году охватывали в основном центральную часть города с максимальными антропогенными эмиссиями (согласно данным ODIAC 2018 и 2019 гг.).

На рис. 2 приведены примеры прямых траекторий между измерениями в фоновой и загрязненной атмосфере, описывающих предполагаемое движение воздушных масс на фоне пространственного распределения антропогенных эмиссий CO₂ базы данных ODIAC [22].

Как показывают инвентаризационные и экспериментальные данные, удельные эмиссии на территории города существенно меняются. По данным базы ODIAC за 2018 г. их вариации достигают двух и более порядка величин, поэтому корректный учет пространственной изменчивости эмиссий представляет нетривиальную проблему. В работе [19] приведены экспериментальные оценки средних удельных эмиссий для ряда дней измерений. Диапазон изменчивости средних эмиссий в зависимости от используемой трассы составлял ~50–150 кт/км² год. Из рис. 2 также следует, что значительные районы мегаполиса не были охвачены наблюдениями программы ЕММЕ 2019 г.

Напомним, что при решении обратной задачи по определению интегральных эмиссий CO₂ Санкт-Петербурга в работах [20, 21] использовались поправочные множители. Эти множители, опреде-

ленные на конкретных трассах, применялись для оценки всей исследуемой территории мегаполиса, а не к определенным районам, по которым проходили трассы перемещения воздушных масс. Такой подход мог приводить к существенным систематическим погрешностям — как к занижениям, так и завышениям реальных интегральных антропогенных эмиссий CO_2 Санкт-Петербурга.

Для количественной оценки данного фактора приведем гистограммы, описывающие распределение антропогенных эмиссий CO_2 на всей территории Санкт-Петербурга [22] и территорий, охваченных наблюдениями на основе упрощенных прямолинейных трасс в дни измерений программы ЕММЕ в 2019 г. (рис. 3). На гистограммах представлено распределение эмиссий по отношению к общему количеству ячеек данных ODIAC за 2018 г. для рассматриваемых площадей.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что большую часть территории Санкт-Петербурга по данным ODIAC (рис. 2а) занимают эмиссии CO_2 со значениями меньше $\sim 20 \text{ кт км}^{-2} \text{ год}^{-1}$, тогда как наименьшую — более $\sim 40 \text{ кт км}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Территории, покрываемые трассами измерений ЕММЕ, преимущественно охватывают эмиссии CO_2 с большими значениями в диапазоне от 15 до $55 \text{ кт км}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Таким образом, систематические погрешности определения интегральных антропогенных эмиссий CO_2 Санкт-Петербурга на основе измерений ЕММЕ в 2019 г. [20, 21] могут быть связаны с тем, что измерения покрывали в основном части города с очень высокими удельными эмиссиями CO_2 .

Рассмотрим простой пример, иллюстрирующий влияние данного фактора. Предположим, что данные ODIAC корректно описывают пространственное распределение антропогенных эмиссий в Санкт-Петербурге. В таком случае средние удельные эмиссии CO_2 $e_{\text{avg}}(t, \Delta s)$ по данным ODIAC для всей территории Санкт-Петербурга с площадью около 1400 км^2 составляют примерно $21.6 \text{ кт км}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Т.е. умножив данное значение удельной эмиссии на площадь города, мы получим “истинную” величину интегральной эмиссии CO_2 Санкт-Петербурга $\sim 30 \text{ Мт год}^{-1}$. Для центральной части города площадью около 1000 км^2 средняя удельная эмиссия $e_{\text{avg}}(t, \Delta s)$ составляет примерно $28.8 \text{ кт км}^{-2} \text{ год}^{-1}$, что примерно на 30% больше по сравнению со средними удельными эмиссиями CO_2 территории всего города.

Мы применили модель дисперсии частиц в атмосфере STILT [24], объединенную с моделью прогноза погоды WRF [25] (STILT-WRF), для моделирования антропогенного вклада Санкт-Петербурга. Модель STILT использует заданные метеорологические поля за весь период моделиро-

вания для переноса частиц в пространстве назад по времени. Для задания метеорологических полей мы предварительно провели серию численных экспериментов по моделированию различных метеорологических параметров при помощи модели WRF версии 4.1.2. Модель WRF была запущена за период марта и апреля 2019 г. с пространственным разрешением 8 км и выводом данных за каждый час. В качестве начальных и граничных условий для моделирования WRF мы использовали данные анализа Global forecast system (GFS) с пространственным разрешением 0.5° и распределением по вертикали на 64 гибридных уровнях (примерно до высоты 55 км) с частотой в 3 ч (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>). Далее мы провели серии численных экспериментов моделью STILT-WRF для дней измерений кампании ЕММЕ 2019 г. В нашем исследовании из пунктов измерений ЕММЕ загрязненного воздуха (подветренные пункты), выпускалось по 2000 частиц, которые затем перемещались назад во времени в течение 6 ч , распределяясь по наветренной территории Санкт-Петербурга. Модель STILT позволяет определить территории мегаполиса, ответственные за формирование антропогенного вклада наветренных частей города (относительно пункта измерений) в ОС CO_2 . Расчеты показывают, что территория, оказывающая наибольшее воздействие (около 80%) на вклад Санкт-Петербурга в содержание CO_2 (по данным моделирования WRF-STILT) занимает относительно небольшую область на востоке города во время проведения измерений ЕММЕ в 2019 году.

4. НОВЫЕ ОЦЕНКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ЭМИССИЙ CO_2 САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Для получения новых оценок антропогенных эмиссий CO_2 Санкт-Петербурга воспользуемся простой балансовой моделью одномерного переноса (1), полученной информацией о влиянии различных территорий Санкт-Петербурга на измеренный антропогенный вклад в ОС CO_2 и корректным учетом повторяющихся трасс наблюдений (использованием их не по отдельности, а в среднем).

$$e_{\text{avg}}(t, \Delta S) = \frac{\Delta UCO_2 \bar{V}}{L} = \frac{\Delta UCO_2}{t_L}, \quad (1)$$

где $e_{\text{avg}}(t, \Delta S)$ — средние удельные эмиссии CO_2 с территории Санкт-Петербурга; ΔUCO_2 — средний антропогенный вклад города в ОС CO_2 ; \bar{V} — осредненная скорость движения воздушной массы; L — длина пути перемещения воздушной массы (длина трассы); t_L — время, за которое воздушная масса проходит конкретную трассу.

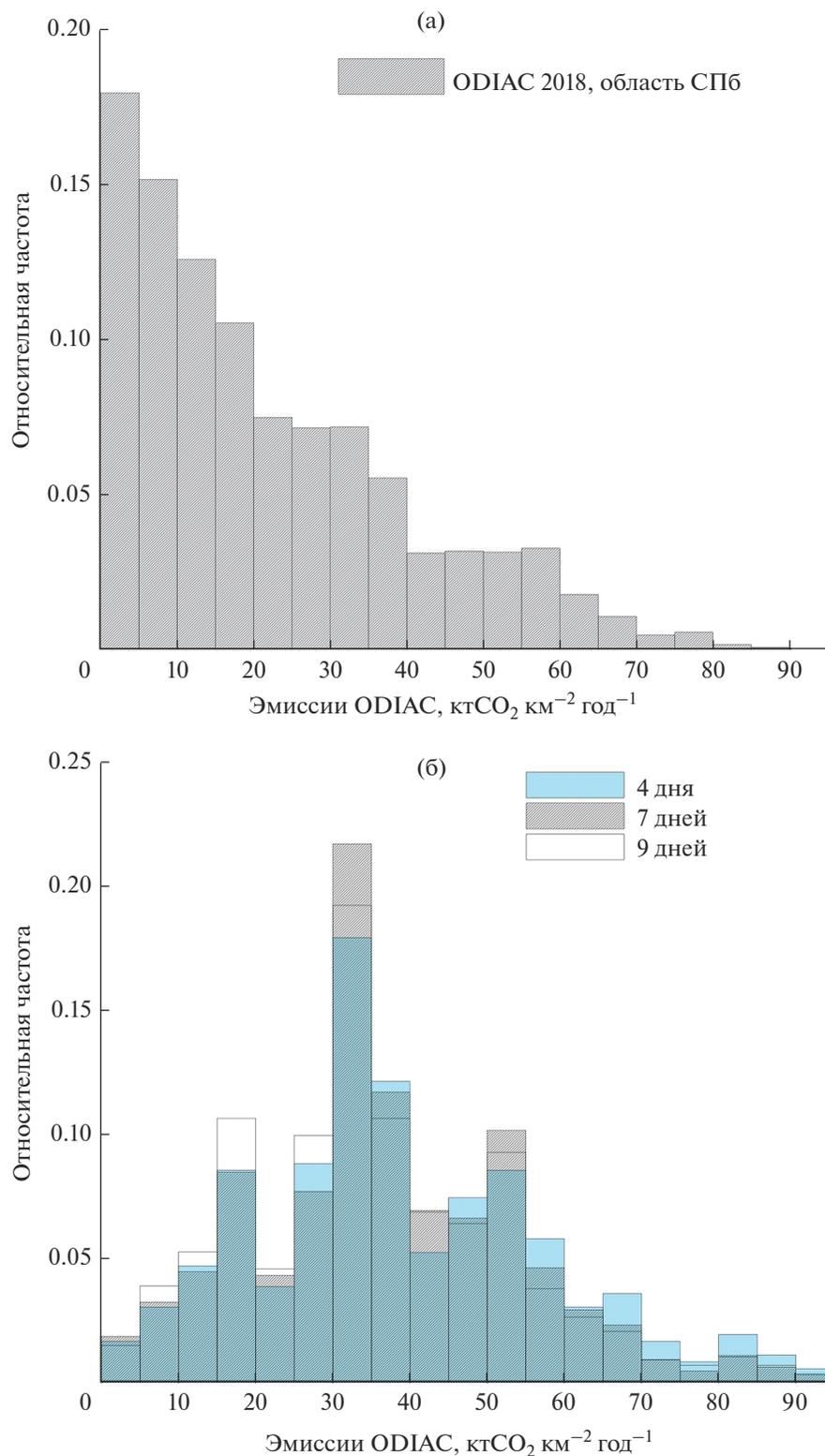


Рис. 3. Гистограмма распределения эмиссий CO₂ по данным ODIAC за 2018 г. на всей территории Санкт-Петербурга (а) и на территориях прямолинейных трасс движения воздушных масс (б) с шириной 1 км в дни измерений ЕММЕ.

Таблица 1. Оценки интегральных антропогенных эмиссий CO₂ Санкт-Петербурга на основе априорных данных ODIAC 2018 г.; WS_{surf} и WS_{avg} – скорость ветра у поверхности Земли и средняя в слое ~ 0–1350 м.

Условия расчетов		Интегральные эмиссии CO ₂ , Мт год ⁻¹
3 измерения в позициях А2-В2	WS _{surf}	46.2
	WS _{avg}	65.8
Среднее по трем измерениям в позициях А2-В2	WS _{surf}	51.9
	WS _{avg}	72.0

Таблица 2. Оценки антропогенных интегральных эмиссий CO₂ Санкт-Петербурга

Метод оценки	Эмиссии Мт/год (год оценки)	Ссылка
Инвентаризация	~30.0 (2015)	[26]
Измерения приземных отношений смеси	44.8 (2019)	[19]
Дифференциальный ИК метод, боксовая модель	65.4 (2019)	[20]
	51.9–72.0 (2019)	Настоящая работа
Дифференциальный ИК метод, модель HYSPLIT	75.8 (2019)	[21]
База данных ODIAC	31.2 (2018)	[22]
	49.1 (2019)	
Copernicus Atmosphere Monitoring Service	66.8 (2018)	[27]
Спутниковые данные OCO-2	39.2 (2018)	[28]

На основе соотношения (1) и априорных эмиссий CO₂ ODIAC рассчитывается ΔUCO₂. Затем модельный антропогенный вклад города соотносится с измеренным в рамках программы ЕММЕ 2019 г. и определяется средний корректирующий множитель \bar{R} (в виде частного).

Новые оценки интегральных эмиссий Санкт-Петербурга основаны на новой методике решения обратной задачи (2),

$$\bar{E}_s = \bar{R}E_c + E_{nc}. \quad (2)$$

В выражении (2) \bar{E}_s – интегральная эмиссия CO₂ с территории всего города; E_c – интегральная эмиссия CO₂ на основе априорных данных с территории, покрытой измерениями; \bar{R} – средний корректирующий коэффициент; E_{nc} – интегральная эмиссия CO₂ на основе априорных данных с территории не покрытой измерениями.

В этой методике коррекция антропогенных эмиссий CO₂ на основе измерений в программе ЕММЕ выполняется только для той части города, которая ответственна за измеренный антропогенный вклад (покрыта измерениями). Антропогенные эмиссии CO₂ для остальных частей мегаполиса берутся из априорной информации – данных антропогенных эмиссий ODIAC.

В табл. 1 приведены оценки антропогенных эмиссий CO₂ Санкт-Петербурга при использовании различных данных о скорости ветра и при разных подходах учета одинаковых трасс измерений.

При использовании трех измерений на трассе А2-В2 по отдельности эмиссии составляют 45.2 и 65.8 Мт/год для приземной и средней скорости ветра в слое 0–1350 м, соответственно. Если использовать при решении обратной задачи среднее по трем измеренным значениям антропогенного вклада, то диапазон оценок эмиссий составляет 51.9–72.0 Мт/год в зависимости от скорости ветра. Изменение методики решения обратной задачи, без изменений других особенностей интерпретации измерений привело к заметному уменьшению оценок антропогенных эмиссий – с 65.4 Мт/год [20] до 46.2 Мт/год, т.е. примерно на 25%, как мы и оценили ранее эффект завышения средних удельных эмиссий за счет измерений в центральных районах мегаполиса.

В табл. 2 приведено сравнение различных оценок интегральных антропогенных эмиссий CO₂ мегаполиса Санкт-Петербурга, полученных в последние годы разными методами. Прежде всего отметим, что диапазон оценок очень большой – от 30 до 75.8 Мт/год. Минимальные оценки эмиссий дает инвентаризационный метод и спутниковые данные – примерно в 2 раза меньше большинства оценок. Отметим, что интегральные эмиссии

CO₂ Санкт-Петербурга по данным ODIAC за 2019 г. более, чем на 50% выше, чем за 2018 г.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Точность наземных экспериментальных методов оценок антропогенных эмиссий CO₂ мегаполисами зависит от многих факторов – объема и погрешностей используемых измерений, охвата наблюдениями исследуемых территорий, требуемого пространственного и временного разрешения оценок, качества используемой разнообразной априорной информации. Исследования пространственных особенностей наземных дифференциальных спектроскопических измерений вклада мегаполиса Санкт-Петербурга в содержание CO₂ в ходе программы ЕММЕ в 2019 г. показывают:

1. При оценке интегральных эмиссий мегаполиса ДС ИК методом, геометрия и количество измерений имеют важное значение. Заметные систематические погрешности в оценках интегральных эмиссий могут быть обусловлены следующими факторами:

– сильной пространственной неоднородностью антропогенных удельных эмиссий CO₂ на территории Санкт-Петербурга,

– использованием измерений на ограниченных территориях города,

– применяемой методикой решения обратной задачи.

В частности, использование измерений ЕММЕ, полученных с отдельных районов города с высокими удельными антропогенными эмиссиями CO₂ для оценки интегральных эмиссий приводит к заметным систематическим погрешностям. Это наглядно демонстрируют функции распределения антропогенных эмиссий CO₂ всего города и территорий, охваченных наблюдениями.

2. Новая методика решения обратной задачи, учитывающая особенности пространственного охвата территории Санкт-Петербурга при проведении программы измерений ЕММЕ 2019 г., дает значения антропогенных эмиссий CO₂ в диапазоне 51.9–72.0 Мт/год. Этот широкий диапазон оценок эмиссий CO₂ обусловлен использованием разных скоростей ветра – приземных или средних в пограничном слое.

3. Сравнения оценок интегральных антропогенных эмиссий CO₂ мегаполиса Санкт-Петербурга, проводимых в последние годы различными методами, демонстрируют очень большой диапазон значений – от ~30 до 75.8 Мт/год. Минимальные оценки интегральных эмиссий CO₂ получены инвентаризационным методом и на основе спутниковых данных. Они примерно в 2 раза меньше большинства опубликованных значений. Причины подобных отличий могут быть следующими – оценки

эмиссий для отличающихся территорий, временные вариации антропогенных эмиссий, случайные и систематические погрешности различных методов, погрешности и объем используемой априорной и дополнительной информации и т.д.

Требуется дальнейшее изучение и совершенствование экспериментальных наземных ДС ИК методов оценок антропогенных эмиссий парниковых газов, в частности, для использования их в валидации спутниковых определений эмиссий CO₂ и других климатических и экологических важных газов.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 13.2251.21.0005 Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
2. IEA. World Energy Outlook 2008. Available online: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2008>.
3. Oda T., Bun R., Kinakh V. et al. Errors and uncertainties in a gridded carbon dioxide emissions inventory // Mitig Adapt Strateg Glob Change. 2019. V. 24. P. 1007–1050.
4. Bovensmann H., Buchwitz M., Burrows J.P., Reuter M., Krings T., Gerilowski K., Schneising O., Heymann J., Treiner A., Erzinger J. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO₂ emissions from space and related applications // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. P. 781–811.
5. Methods for Remote Determination of CO₂ Emissions. The MITRE Corporation JASON Program Office 7515 Colshire Drive McLean, Virginia 22102, January 13, 2011.
6. Bergamaschi P., Danila A., Weiss R.F., Ciais P., Thompson R.L., Brunner D., Levin I., Meijer Y., Chevallier F., Janssens-Maenhout G., Bovensmann H., Crisp D., Basu S., Dlugokencky E., Engelen R., Gerbig C., Günther D., Hammer S., Henne S., Houweling S., Karstens U., Kort E., Maione M., Manning A.J., Miller J., Montzka S., Pandey S., Peters W., Peylin P., Pinty B., Ramonet M., Reimann S., Röckmann T., Schmidt M., Strogies M., Sus-sams J., Tarasova O., van Aardenne J., Vermeulen A.T., Vogel F. Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories, EUR 29276 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-88938-7. <https://doi.org/10.2760/759928>, JRC111789
7. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO₂ и CH₄ в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Докл. Академии наук. 2019. Т. 488. № 1. С. 74–80.

8. *Enting I.G.* Inverse Problems in Atmospheric Constituent Transport. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002. 392 p.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511535741>
9. *Basu S., Baker D.F., Chevallier F., Patra P.K., Liu J., Miller J.B.* The impact of transport model differences on CO₂ surface flux estimates from OCO-2 retrievals of column average CO₂ // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 7189–7215.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-7189-2018>
10. *Peylin P., Law R.M., Gurney K.R., Chevallier F., Jacobson A.R., Maki T., Niwa Y., Patra P.K., Peters W., Rayner P.J., Rödenbeck C., van der Laan-Luijckx I.T., Zhang X.* Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO₂ inversions // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. P. 6699–6720.
<https://doi.org/10.5194/bg-10-6699-2013>
11. A Guidebook on the Use of Satellite Greenhouse Gases Observation Data to Evaluate and Improve Greenhouse Gas Emission Inventories, 1-st ed.; *T. Matsunaga, S. Maksyutov*, Eds.; Satellite Observation Center, National Institute for Environmental Studies, Japan, 2018; p. 129
12. *Wunch D., Toon G.C., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O.* The Total Carbon Column Observing Network // *Philos. T. Roy. Soc. A*. 2011. V. 369. P. 2087–2112.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>
13. *Hase F., Frey M., Blumenstock T., Groß J., Kiel M., Kohlhepp R., Mengistu Tsidu G., Schäfer, K., Sha M.K., Orphal J.* Application of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions of the major city 640 Berlin // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 3059–3068.
<https://doi.org/10.5194/amt-8-3059-2015>
14. *Chen J., Viatte C., Hedelius J.K., Jones T., Franklin J.E., Parker H., Gottlieb E.W., Wennberg P.O., Dubey M.K., Wofsy S.C.* Differential column measurements using compact solar-tracking spectrometers // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 8479–8498.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-8479-2016>
15. *Frey M., Hase F., Blumenstock T., Groß J., Kiel M., Mengistu Tsidu G., Schäfer K., Sha K. M., Orphal J.* Calibration and instrumental line shape characterization of a set of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 3047–3057.
<https://doi.org/10.5194/amt-8-3047-2015>
16. *Vogel F.R., Frey M., Staufer J., Hase F., Broquet G., Xueref-Remy I., Chevallier F., Ciais P., Sha M.K., Chelin P., Jeseck P., Janssen C., Té Y., Groß J., Blumenstock T., Tu Q., Orphal J.* XCO₂ in an emission hot-spot region: the COCCON Paris campaign 2015 // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 3271–3285.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-3271-2019>
17. *Tu Q., Hase F., Blumenstock T., Kivi R., Heikkinen P., Sha M.K., Raffalski U., Landgraf J., Lorente A., Borsdorff T., Chen H., Dietrich F., Chen J.* Intercomparison of atmospheric CO₂ and CH₄ abundances on regional scales in boreal areas using Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) analysis, Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON) spectrometers, and Sentinel-5 Precursor satellite observations // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. V. 13. P. 4751–4771.
<https://doi.org/10.5194/amt-13-4751-2020>
18. *Dietrich F., Chen J., Voggenreiter B., Aigner P., Nachtigall N., Reger B.* MUCCnet: Munich Urban Carbon Column network // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 1111–1126.
<https://doi.org/10.5194/amt-14-1111-2021>
19. *Makarova M.V., Alberti C., Ionov D.V., Hase F., Foka S.C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Y., Kostsov V., Frey M., Poberovskii A.V., Timofeyev Y.M., Paramonova N., Volkova K.A., Zaitsev N.A., Biryukov E.Y., Osipov S.I., Makarov B.K., Polyakov A.V., Ivakhov V.M., Imhasin H.Kh., Mikhailov E.F.* Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): an overview and first results of the St. Petersburg megacity campaign-2019 // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 1047–1073.
<https://doi.org/10.5194/amt-14-1047-2021>
20. *Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Виролайнен Я.А., Поберовский А.В., Фока С.Ч.* Оценки антропогенных эмиссий CO₂ мегаполиса Санкт-Петербурга. Доклады РАН. Науки о Земле, 494, 1, 97–100.
<https://doi.org/10.31857/S2686739720090182>
21. *Ionov Dmitry V., Maria V. Makarova, Frank Hase, Stefani C. Foka, Vladimir S. Kostsov, Carlos Alberti, Thomas Blumenstock, Thorsten Warneke, Yana A. Virolainen.* The CO₂ integral emission by the megacity of St. Petersburg as quantified from ground-based FTIR measurements combined with dispersion modelling // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 10939–10963.
<https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021>
22. *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. V. 11. P. 543–556.
<https://doi.org/10.5194/acp-11-543-2011>
23. *Zhao X., Marshall J., Hachinger S., Gerbig C., Frey M., Hase F., Chen J.* Analysis of total column CO₂ and CH₄ measurements in Berlin with WRF-GHG // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 11279–11302.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-11279-2019>
24. *Lin J.C., Gerbig C., Wofsy S.C., Andrews A.E., Daube B.C., Davis K.J., Grainger C.A.* A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 4493.
<https://doi.org/10.1029/2002JD003161D16>
25. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X.-Y.* A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR. 2019. 145 p.
<https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
26. Serebriisky I.A. (Ed.): The Report on Environmental Conditions in St. Petersburg for 2017, available at: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2018/06/29/Doklad_EKOLOGIA2018.pdf
27. <https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/FileRepository/Resources/Documentation/Fluxes>
28. *Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Поберовский А.В., Макарова М.В., Поляков А.В.* Оценки антропогенных эмиссий CO₂ для Москвы и Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений OCO-2 // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. № 4. С. 261–265.
<https://doi.org/10.15372/AOO20200403>

Experimental Estimates of Integral Anthropogenic CO₂ Emissions from Saint-Petersburg City

Yu. M. Timofeyev^{1, *}, G. M. Nerobelov^{1, 2, 3, **}, and A. V. Poberovskii¹

¹ Saint-Petersburg State University, University Embankment, 7/9, Saint-Petersburg, 199034 Russia

² Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, Korpusnaya st., 18, Saint-Petersburg, 187110 Russia

³ Russian State Hydrometeorological University, Malookhtinskiy Prospekt, 98, Sankt-Petersburg, 195196 Russia

*e-mail: y.timofeev@spbu.ru

**e-mail: akulische95@mail.ru

An increase of greenhouse gases content (CO₂, CH₄, N₂O and others) in the Earth's atmosphere affects radiation balance leading to the climate changes of the planet. Anthropogenic CO₂ emissions from the territory of megacities play an important role in this process contributing approximately 70% of the total anthropogenic emissions of carbon dioxide. In this study integral anthropogenic CO₂ emissions of Saint-Petersburg megacity were estimated using observation data of EMMЕ 2019 campaign. Here we used a new approach of inverse problem solution which was based on a priori data and scale coefficients applied only to the city's areas covered by observations. New estimates of the integral anthropogenic CO₂ emissions of Saint-Petersburg are in a range 52–72 MtCO₂/year. These emissions are significantly higher than inventory-based estimates (~30 MtCO₂/year). However, the minimal value of this range (52 MtCO₂/year) is lower by approximately 21% than emissions which were found by us earlier using EMMЕ 2019 data (65 MtCO₂/year).

Keywords: CO₂ emissions of Saint-Petersburg, differential approach, ground-based spectroscopic measurements, errors, ODIAC, STILT