

Анализ содержания и эмиссии CO_2 по данным спутниковых измерений ОСО-2

Г. В. Кобзарь¹, Г. М. Неробелов^{1,2,3}, Ю. М. Тимофеев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: kobzargv@mail.ru

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия

³ Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, 192007, Россия

Наблюдающиеся изменения климата Земли обусловили необходимость мониторинга содержания парниковых газов и прежде всего CO_2 — основного антропогенного газа. В последние десятилетия для мониторинга общего содержания CO_2 и его антропогенной эмиссии активно используются спутниковые дистанционные измерения. В работе приведены примеры анализа измерений XCO_2 спутником ОСО-2 (англ. Orbiting Carbon Observatory-2) с целью изучения пространственно-временного распределения содержания CO_2 в окрестностях промышленных городов России (16 городов) и оценок его антропогенной эмиссии. Для городов (Челябинск, Екатеринбург и Новосибирск) подробно изучены временные вариации XCO_2 и для Челябинска даны оценки антропогенной эмиссии CO_2 с помощью спутниковых измерений ОСО-2. Сезонный ход XCO_2 в районе исследуемых городов характерен максимумом в конце зимы — начале весны и минимумом в конце лета, что соответствует сезонному изменению содержания CO_2 и в других частях планеты. Диапазон многолетних трендов XCO_2 по данным измерений ОСО-2 в г. Челябинске, Новосибирске и Екатеринбурге соответствует 1,9–2,7 ppm/год. Оценка эмиссии CO_2 с территории г. Челябинска за 5 июня 2021 г. при помощи измерений ОСО-2 составляет $16 \text{ Мт} \cdot \text{г}^{-1}$ с территории вероятного источника или $\sim 0,9 \text{ Мт} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$. Анализ антропогенной эмиссии CO_2 на основе инвентаризационных баз данных EDGAR (англ. Emissions Database for Global Atmospheric Research) v8.0 за 2021 г. показал, что удельная эмиссия газа на территории города равна $\sim 0,5 \text{ Мт} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$.

Ключевые слова: XCO_2 в России, антропогенная эмиссия CO_2 , дистанционные измерения, спутниковые измерения ОСО-2, многолетние тренды XCO_2 , CO_2 в промышленных городах

Одобрена к печати: 15.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-281-289

Введение

Наблюдающиеся изменения климата Земли обусловили необходимость мониторинга и изучения процессов, которые на него влияют. Углекислый газ (CO_2) — это основной антропогенный парниковый газ, который вносит существенный вклад в парниковый эффект после водяного пара. Непрерывный рост CO_2 наблюдается с середины XIX в. С периода начала регулярных наблюдений в середине прошлого века содержание CO_2 в атмосфере увеличилось почти в 1,5 раза. С ноября 2015 г. оно стабильно превысило 400 ppm, а в мае 2020 г. по данным обсерватории на Мауна-Лоа (Гавайи, США) (англ. Mauna Loa Observatory) средняя концентрация CO_2 составила 417,1 ppm (Climate..., 2013) (<https://qsstudy.com/carbon-dioxide-concentrations-break-417ppm-for-the-first-time-in-history>). Измерения в обсерватории на Мауна-Лоа показывают устойчивый рост средней концентрации атмосферного CO_2 с 315 ppm в 1958 г. до 414,7 ppm в среднем за 2021 г. и до 420,99 ppm (0,04 %) в мае 2022 г. В мае 2024 г. содержание среднего по высоте отношения смеси CO_2 для сухой атмосферы (или XCO_2) достигло 426 ppm (<https://new-science.ru/uroven-co2-rastet-bystree-chem-kogda-libo-prezhde>). Источниками эмиссии CO_2 являются как естественные, так и антропогенные процессы. Среди антропогенных источников значительный вклад вносят промышленность и транспорт. Промышленные города мира выступают крупными источниками CO_2 (Gale et al., 2005).

В последние десятилетия для мониторинга общего содержания CO₂ и его антропогенной эмиссии активно используются спутниковые дистанционные измерения (Uspensky, 2023). Регулярные измерения CO₂ были начаты с помощью прибора SCIAMACHY (*англ.* Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography), а затем продолжены приборами спутников GOSAT (*англ.* Greenhouse Gases Observing Satellite) и GOSAT-2, OCO-2 (*англ.* Orbiting Carbon Observatory-2) и OCO-3 (Yang et al., 2020), которые регистрируют спектры отражённого и рассеянного солнечного излучения с высоким разрешением и высокой точностью в ближней инфракрасной области электромагнитного спектра. Спутниковые измерения CO₂ для мониторинга антропогенной эмиссии необходимо осуществлять с погрешностью ~0,25 ppm и менее, так как антропогенный вклад источников в городе в содержание CO₂ в среднем составляет ~1–5 ppm (0,2–1 % от среднего текущего содержания XCO₂). После длительных усовершенствований методики обработки измерений спутником OCO-2 содержание CO₂ в атмосфере Земли определяется со случайной погрешностью 0,5–1,0 ppm (Rißmann et al., 2022).

В настоящей работе приведены примеры анализа измерений XCO₂ спутником OCO-2 с целью изучения пространственно-временного распределения содержания CO₂ в окрестностях промышленных городов России. Ранее данные OCO-2 использовались для единичных оценок антропогенной эмиссии CO₂ в Москве и Санкт-Петербурге (Тимофеев и др., 2020).

Данные и методы. Спутниковые измерения OCO-2

В исследовании использовались данные об XCO₂ на основе спутниковых измерений OCO-2 (<https://ocov2.jpl.nasa.gov>). Надирный прибор, установленный на борту спутника, состоит из трёх спектрометров и с 2014 г. измеряет солнечное отражённое и рассеянное излучение в ближней инфракрасной области с высоким спектральным разрешением (0,04–0,10 нм), высоким динамическим диапазоном (10⁴), хорошим отношением сигнал/шум (~400), относительно высоким пространственным разрешением (~1,5×2,5 км), однако с небольшой частотой измерений над конкретной территорией — примерно раз в 16 дней. Измерения прибора OCO-2 осуществляются в полосах поглощения 0,765 мкм (O₂), 1,61 и 2,06 мкм (слабая и сильная полосы поглощения CO₂). На основе спутниковых измерений доступны данные о среднем по высоте отношении смеси (XCO₂) для сухой атмосферы в дневное время и в отсутствие облаков. Соответственно, из-за узкой полосы обзора прибора и низкой частоты измерений данные за один день могут покрывать лишь некоторую область города.

Спутниковые измерения XCO₂ доступны на сайте (<https://disc.gsfc.nasa.gov>) и представлены в виде данных высокого (флаг «0») и среднего качества (флаг «1»). Качество спутниковых данных существенно меняется в зависимости от многих факторов, в том числе от состояния атмосферы и характера подстилающей поверхности. Для исследования были получены спутниковые данные в радиусе 100 км для городов России за период с 2014 по 2023 г. Для отбора городов использовались источники в сети Интернет, основными из которых были данные по выбросам за 2018–2022 гг. на сайте Росприроднадзора (<https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect>) и доклад Министерства природных ресурсов за 2019 г. ([https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/cf1/07_09_2020_M_P_O%20\(1\).pdf](https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/cf1/07_09_2020_M_P_O%20(1).pdf)) с рейтингом городов по уровню загрязнения. Несмотря на большое количество данных, именно в городах южной части России со спутника OCO-2 (много случаев безоблачной атмосферы) явно выраженную корреляцию между XCO₂ и расположением техногенных объектов в крупных городах юга России получалось выявить чрезвычайно редко. В процессе анализа всех отобранных дней для 16 городов наиболее показательными оказались пять случаев, для которых повышенное содержание углекислого газа соответствует расположению ТЭЦ (теплоэлектроцентраль) и наиболее загрязнённых, согласно данным платформы географической информационной системы (<https://www.arcgis.com>), промышленных районов городов — по два дня в Челябинске (05.06.2021, 30.10.2022) и Екатеринбурге (05.06.2021, 07.07.2021) и один день в Новосибирске (04.05.2016).

Результаты и обсуждения

Особенности пространственно-временных изменений XCO_2

На рис. 1 приведены временные вариации среднесуточных (см. рис. 1а) и среднегодовых (см. рис. 1б) значений XCO_2 для Новосибирска. Цветом на графике со среднегодовыми приводится доверительный интервал 95 %. Рисунок 1 показывает постепенное повышение содержания углекислого газа по годам с колебаниями по сезонам, что также характерно для Екатеринбурга и Челябинска (графики не приводятся). В конце 2014 г. значение составляло менее 400 ppm, а в начале 2024 г. — ~422 ppm.

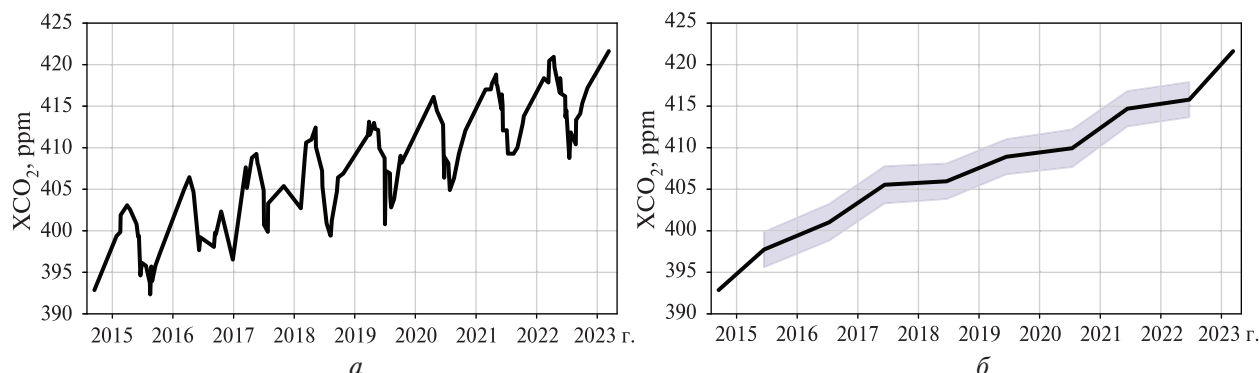


Рис. 1. Временные вариации среднесуточных (а) и среднегодовых (б) значений XCO_2 для Новосибирска на основе спутниковых измерений ОСО-2; серым цветом приводится доверительный интервал 95 %

На рис. 2 приведены сезонные вариации XCO_2 для Новосибирска за 2014–2023 гг. Максимум XCO_2 наблюдался в начале апреля 2022 г. (~411–415 ppm), а минимум, для которого доступна оценка доверительного интервала, — в августе (400–405 ppm). Отметим, что среднесезонные значения, для которых отсутствуют оценки доверительных интервалов (январь, ноябрь и декабрь), получены на основе лишь одной среднесуточной величины и характеризуют в определённой степени конкретный год и месяц. Значения для данных месяцев не описывают характерный вид сезонного хода CO_2 (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/weekly.html>).

Амплитуда сезонного хода за 2014–2023 гг. составляет ~12 ppm. Анализ спутниковых данных ОСО-2 указывает на то, что многолетнее общее содержание CO_2 в атмосфере в районе исследуемых городов изменяется, как и на других участках планеты, в частности, на станции Мауна-Лоа, Гавайи, США (Basu et al., 2011).

В табл. 1. приведена краткая информация по пяти случаям высоких значений XCO_2 на территории исследуемых городов по данным измерений ОСО-2. Зафиксированные увеличенные значения могут быть связаны с антропогенной эмиссией CO_2 . Из таблицы видно, что для каждого из случаев повышенных значений XCO_2 наблюдалась низкая скорость ветра у поверхности земли. При этом в Челябинске отмечаются наибольшие значения XCO_2 (сравнивая с Екатеринбургом) при наибольшей скорости ветра (2–3 м/с против 1 м/с). Это говорит о возможно ещё большей антропогенной эмиссии CO_2 в Челябинске.

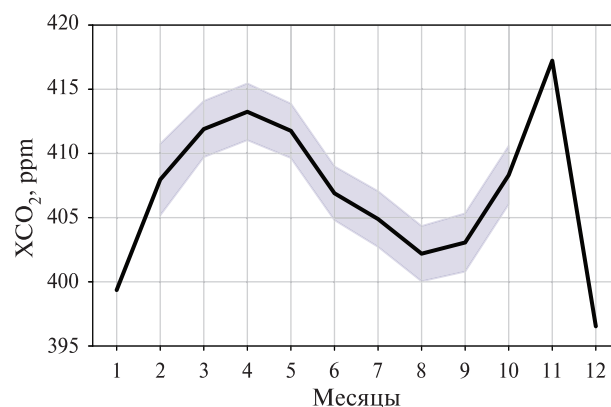


Рис. 2. Сезонные вариации XCO_2 для Новосибирска за 2014–2023 гг. на основе спутниковых измерений ОСО-2

Таблица 1. Характеристики случаев повышенного XCO₂ на территории Челябинска, Новосибирска и Екатеринбурга по данным спутниковых измерений OCO-2

Город	Координаты ° с. ш.; ° в. д.	Даты	Пиковые значения XCO ₂ , ppm	Направление ветра
Челябинск	55,16; 61,43	05.06.2021 30.10.2022	420 420	ЮВ 2 м/с Ю, ЮВ 2–3 м/с
Новосибирск	55,00; 82,93	04.05.2016	407	Переменный 1 м/с, штиль
Екатеринбург	56,58; 60,61	05.06.2021 07.07.2021	418 414	ЮЗ, ЗСЗ 1 м/с СЗ, штиль 1 м/с

Примечание: ЮВ — юго-восточный, Ю — южный, ЮЗ — юго-западный, ЗСЗ — западо-северо-западный, СЗ — северо-западный.

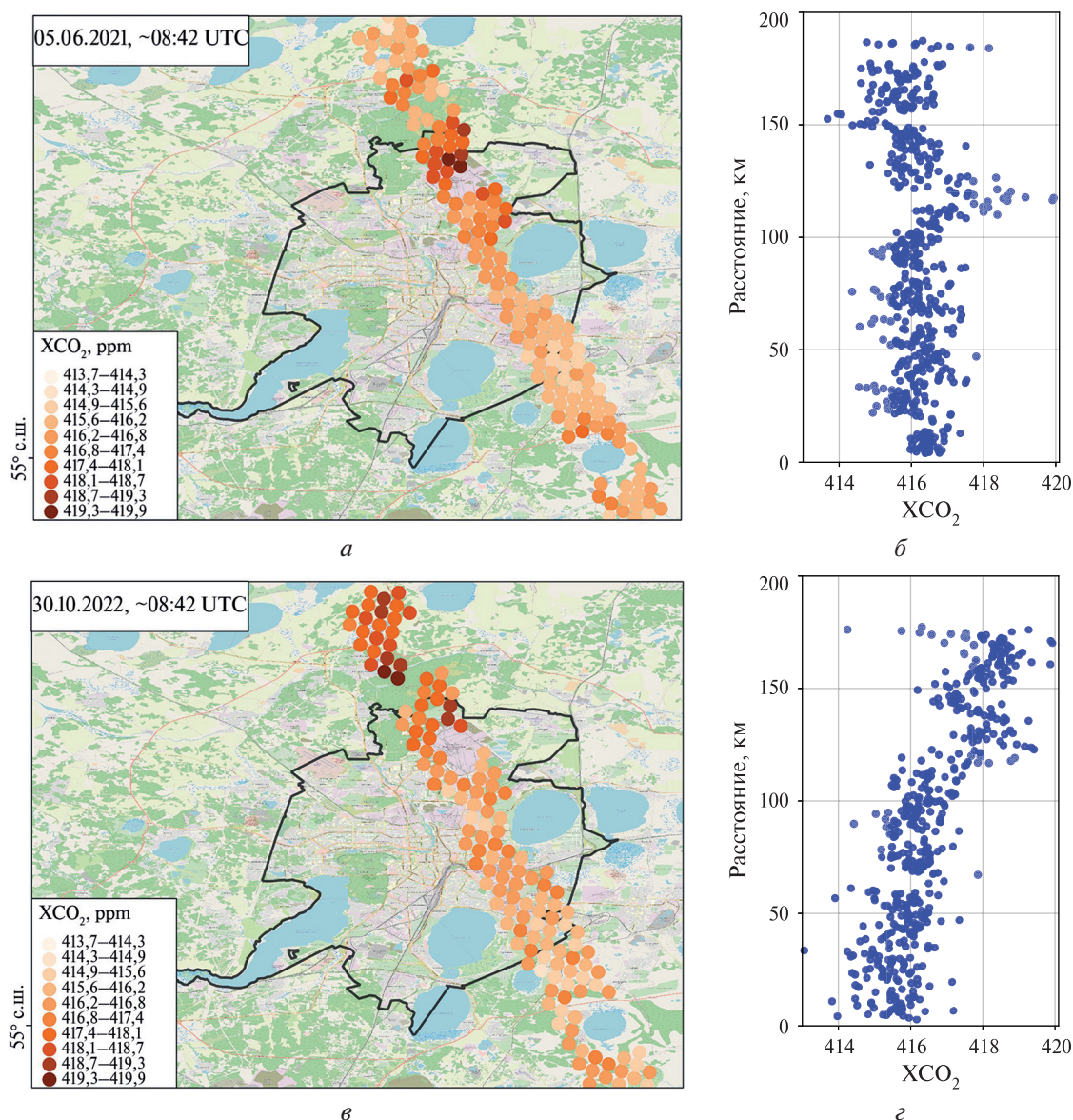


Рис. 3. Пространственное распределение XCO₂ (а, в) и XCO₂ по пути движения спутника через город с юга на север (б, з) по данным измерений OCO-2 в районе Челябинска за 05.06.2021 (а, б), 30.10.2022 (в, з); чёрный контур — территория г. Челябинска; UTC (англ. Coordinated Universal Time) — всемирное координированное время; по вертикальной оси — расстояние (в км), пройденное спутником через территорию города (с юго-востока на северо-запад)

На рис. 3 (см. с. 284) представлены примеры изменений XCO₂ по данным ОСО-2 вдоль трассы движения спутника в районе Челябинска в отдельные дни наблюдений. Приведённые рисунки демонстрируют многочисленные максимумы содержания XCO₂ по сравнению со средними XCO₂ на трассах в 100 км. Амплитуды максимальных значений достигают 3–4 ppm, положение некоторых из них соответствуют локальным городским источникам — чаще всего ТЭЦ и промышленным объектам. Видно, что наиболее явный случай повышенного содержания XCO₂ наблюдается в г. Челябинске за 05.06.2021 (см. рис. 3а). Более того, именно данный максимум территориально хорошо коррелирует с положением промышленной части города.

Оценки годовых трендов XCO₂ по данным ОСО-2

Большое внимание в исследованиях XCO₂ в последние годы уделялось оценкам годовых трендов содержания CO₂ в связи с необходимостью проведения прогнозов изменений климата Земли (Арефьев и др., 2014; Тимофеев и др., 2019; Фока и др., 2019; Reuter et al., 2019; Wunch et al., 2017; <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/b54d8149-2864-4fb9-96b9-5fd3a020c224>; <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>). Данные Глобальной лаборатории GML (англ. Global Monitoring Laboratory) NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration) свидетельствуют, что за период 2000–2023 гг. ежегодные приращения отношения смеси CO₂ в районе обсерватории Мауна-Лоа находились в диапазоне 1,54–3,36 ppm, а соответствующие средние глобальные значения составляли 1,25–2,95 ppm (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gr.html>). Многочисленные оценки ежегодных приращений на основе локальных и дистанционных измерений соответствуют указанным выше вариациям. Можно также отметить, что в последние десятилетия наблюдается увеличение ежегодных приращений CO₂. Анализ вариаций ежегодных изменений содержания XCO₂ в атмосфере для трёх городов РФ для весенних и летних месяцев по данным спутниковых измерений ОСО-2 указывает на значения 1,9–2,7 ppm·год⁻¹ (табл. 2), которые близки к приведённым выше диапазонам оценок. Амплитуда вариаций XCO₂ на период измерений с 2014 по 2022 г. достигает 20 ppm и более и максимальна для июня в Челябинске.

Таблица 2. Оценки годовых трендов содержания XCO₂ в районе г. Челябинска, Екатеринбурга и Новосибирска за 2014–2022 гг.

Город	Апрель	Май	Июнь	Июль
Челябинск, XCO ₂ min/max, ppm	402,3/420,4	401,0/417,5	395,9/417,8	394,0/411,2
Челябинск, dXCO ₂ , ppm·год ⁻¹	2,3	2,4	2,7	2,5
Екатеринбург, XCO ₂ min/max, ppm	—	400,2/415,3	401,7/416,2	—
Екатеринбург, dXCO ₂ , ppm·год ⁻¹		2,2	2,1	
Новосибирск, XCO ₂ min/max, ppm	402,6/420,3	404,6/417,7	397,7/415,1	
Новосибирск, dXCO ₂ , ppm·год ⁻¹	2,2	1,9	2,2	

Примечание: min (англ. minimum) — минимум, max (англ. maximum) — максимум, dXCO₂ — тренд среднего отношения смеси CO₂

Пример оценки антропогенной эмиссии CO₂ с помощью данных измерений ОСО-2

В последние десятилетия спутниковые измерения широко используются для оценок антропогенной эмиссии CO₂ локальных и региональных источников (см., например, публикации (Reuter et al., 2019; Wunch et al., 2017)). В настоящей работе проведена оценка эмиссии с территории г. Челябинска на примере измерений ОСО-2 за 05.06.2021. В этот день наблюдалось

выраженное увеличение XCO₂ по данным измерений (см. *рис. 3а*) примерно на 4 ppm относительно среднего (~416,2 ppm) при стандартном отклонении среднего ~0,78 ppm.

Оценка антропогенной эмиссии с использованием спутниковых измерений OCO-2 осуществлялась по методике из публикации (Hakkarainen et al., 2016), но в упрощённом виде. Для случаев выраженного локального увеличения измерения общего содержания CO₂ по пути движения спутника аппроксимированы с помощью следующего выражения:

$$XCO_2 = a_0 + a_1x + a_2 \exp\left\{-4\ln(2) \cdot (x - a_3)^2 a_4^{-2}\right\}, \quad (1)$$

которое состоит из линейной функции и функции Гаусса. Параметры a_{0-4} подбирались при помощи метода максимального правдоподобия MLE (*англ.* maximum likelihood estimation).

Затем оценивалась эмиссия CO₂ (FCO₂ (в Мт CO₂·с⁻¹)) с территорий, покрываемых спутниковыми измерениями, с помощью следующего выражения, основанного на интегрировании распределения (1):

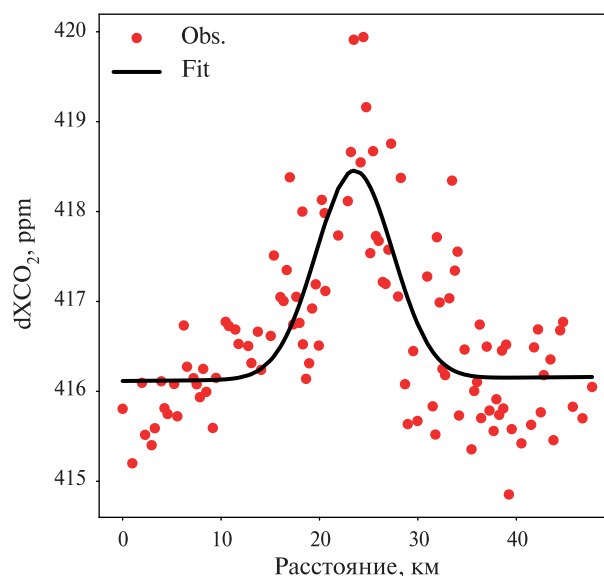
$$FCO_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\ln(2)}} \cdot \frac{MCO_2}{N_A} n_e a_4 a_2 v_e, \quad (2)$$

где MCO₂ — молярная масса CO₂ (~44 г·моль⁻¹); N_A — число Авогадро; n_e — количество молекул воздуха в атмосферном столбе (в молекул·м⁻²); a₄ — ширина спутниковой сцены, покрывающая приращения XCO₂, не менее чем в два раза меньше максимальной заданной величины ~4 ppm (в км); a₂ — константа, определяемая из выражения (1) и характеризующая амплитуду значений содержания XCO₂ для выбранного случая измерений OCO-2 (в ppm); v_e — скорость ветра, перпендикулярная направлению движения спутника (в м·с⁻¹).

Выражение (2) в приведённом виде характеризует эмиссию CO₂ за 1 с. Далее, для получения оценки эмиссии за год умножаем на число секунд в году, что, конечно, является простейшим оценочным представлением. Для задания скорости ветра и расчёта количества молекул воздуха использовались данные измерений с сайта gr5.ru на метеостанции в г. Челябинске за 05.06.2021.

Увеличение XCO₂ в районе г. Челябинска было аппроксимировано с помощью выражения (1), результат аппроксимации приведён на *рис. 4*. Стандартное отклонение разности аппроксимации с измерениями составляет ~0,68 ppm при коэффициенте корреляции 0,74 на основе 109 значений.

Рис. 4. Результат аппроксимации XCO₂ (Fit) по данным измерений OCO-2 (Obs.) с помощью выражения (1) в районе Челябинска за 05.06.2021; по горизонтальной оси — расстояние от начала движения спутника над городом (в км)



Расчёт эмиссии с территории Челябинска на основе выражения (2) привёл к значению ~16 Мт CO₂·г⁻¹. Погрешности оценки эмиссии составляют 30–50 % и обусловлены погрешностями измерений OCO-2 и использованием дополнительной информации. Значение

характеризует область площадью $6,5(a_4) \times 2,7$ км (ширина области самых высоких значений XCO₂ по данным ОСО-2 за 05.06.2021), что составляет $\sim 17,6$ км². Территориально источник эмиссии соответствует расположению Челябинского металлургического комбината. При пересчёте на квадратный километр оценка антропогенной эмиссии CO₂ с территории промышленного объекта в Челябинске составляет $0,9$ Мт·г⁻¹·км⁻².

Согласно базе данных EDGAR v8.0 (<https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/b54d8149-2864-4fb9-96b9-5fd3a020c224>), антропогенная эмиссия CO₂ с территории всего города достигает ~ 24 Мт·г⁻¹. Учитывая, что площадь Челябинска равна примерно 530 км², то средняя антропогенная эмиссия CO₂ с территории города по данным EDGAR составляет $0,05$ Мт·г⁻¹·км⁻². Данная оценка как минимум на порядок ниже, чем значение, полученное на основе спутниковых измерений ОСО-2.

Заключение

В работе проведён анализ пространственно-временного распределения общего содержания CO₂ в атмосфере в окрестностях 16 городов России. Для г. Челябинск, Екатеринбург и Новосибирск подробно изучены временные вариации XCO₂ и для Челябинска дана оценка антропогенной эмиссии CO₂ с помощью спутниковых измерений ОСО-2.

Сезонный ход XCO₂ в районе исследуемых городов характерен максимумом в конце зимы—начале весны и минимумом в конце лета, что соответствует сезонному изменению содержания CO₂ и в других частях планеты. Годовая амплитуда вариаций CO₂ равна 10–12 ppm. Диапазон многолетних трендов XCO₂ по данным измерений ОСО-2 в г. Челябинске, Новосибирске и Екатеринбурге составляет $1,9$ – $2,7$ ppm·год⁻¹, максимальная оценка превышает значения тренда для фоновой обсерватории Мауна-Лоа для последних 10 лет ($2,28$ ppm·год⁻¹).

Явное увеличение содержания CO₂ по данным спутниковых наблюдений удалось зарегистрировать лишь на территории г. Челябинска, которое вероятно было вызвано эмиссией крупного городского стационарного источника. Оценка эмиссии CO₂ с территории г. Челябинска за 5 июня 2021 г. при помощи измерений ОСО-2 составляет 16 Мт·г⁻¹ с территории вероятного источника или $\sim 0,9$ Мт·г⁻¹·км⁻². Анализ антропогенной эмиссии CO₂ на основе инвентаризационных баз данных EDGAR v8.0 за 2021 г. показал, что удельная эмиссия газа на территории города равна $\sim 0,5$ Мт·г⁻¹·км⁻².

Оценка эмиссии CO₂, полученная на основе спутниковых измерений, оказалась почти на порядок выше той, что доступна на основе международной инвентаризации. Это указывает на значимость независимой оценки антропогенной эмиссии этого газа с территорий отдельных городов, используя данные измерений.

Работа по анализу спутниковых измерений прибора ОСО-2 и оценка антропогенной эмиссии XCO₂ российских городов выполнена в Лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы Санкт-Петербургского государственного университета при поддержке СПбГУ, шифр проекта 124032000025-1. Авторы благодарят учёных из NASA за свободный доступ к спутниковым измерениям ОСО-2.

Литература

1. Арефьев В. Н., Каменогрaдский Н. Е., Кашин Ф. В., Шилкин А. В. Фоновая составляющая концентрации двуокиси углерода в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск») // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 6. С. 655–662. <https://doi.org/10.7868/S0002351514060030>.
2. Тимофеев Ю. М., Поляков А. В., Виролайнен Я. А. и др. Оценки долговременных трендов содержания климатически важных атмосферных газов вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 56. № 1. С. 97–103. <https://doi.org/10.31857/S0002351520010113>.

3. Тимофеев Ю. М., Березин И. А., Виролайнен Я. А. и др. Оценки антропогенных эмиссий CO₂ для Москвы и Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений OCO-2 // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. Т. 33. № 4. С. 261–265. <https://doi.org/10.15372/AOO20200403>.
4. Фока С. Ч., Макарова М. В., Поберовский А. В., Тимофеев Ю. М. Временные вариации концентрации CO₂, CH₄ и CO в пригороде Санкт-Петербурга (Петергоф) // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32. № 10. С. 860–866. <https://doi.org/10.15372/AOO20191010>.
5. Basu S., Houweling S., Peters W. et al. The seasonal cycle amplitude of total column CO₂: Factors behind the model-observation mismatch // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. V. 116. Article D23306. <https://doi.org/10.1029/2011JD016124>.
6. Climate Change 2013: The physical science basis. Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; N.Y.: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
7. Gale J., Bradshaw J., Chen Z. et al. Sources of CO₂ // *IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*. Ch. 2. Cambridge; N.Y.: Cambridge University Press, 2005. P. 75–104.
8. Hakkarainen J., Ialongo I., Tamminen J. Direct space-based observations of anthropogenic CO₂ emission areas from OCO // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. Iss. 21. P. 11400–11406. <https://doi.org/10.1002/2016GL070885>.
9. Reuter M., Buchwitz M., Schneising O. et al. Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: co-located regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. P. 9371–9383. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9371-2019>.
10. Reißmann M., Chen J., Osterman G. et al. Comparison of OCO-2 target observations to MUCNet — is it possible to capture urban X_{CO₂} gradients from space? // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2022. V. 15. P. 6605–6623. <https://doi.org/10.5194/amt-15-6605-2022>.
11. Uspensky A. B. Atmospheric greenhouse gas distributions: Satellite-based measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023. V. 59. Iss. Suppl. 2. P. S232–S241. <https://doi.org/10.1134/S0001433823140141>.
12. Wunch D., Wennberg P. O., Osterman G. et al. Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) X_{CO₂} measurements with TCCON // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. V. 10. P. 2209–2238. <https://doi.org/10.5194/amt-10-2209-2017>.
13. Yang E. G., Kort E. A., Wu D. et al. Using space-based observations and Lagrangian modeling to evaluate urban carbon dioxide emissions in the Middle East // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2020. V. 125. Article e2019JD031922. <https://doi.org/10.1029/2019JD031922>.

Analysis of CO₂ content and emission based on OCO-2 satellite measurements

G. V. Kobzar¹, G. M. Nerobelov^{1,2,3}, Yu. M. Timofeev¹

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
E-mail: kobzargv@mail.ru

² Saint Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS
Saint Petersburg 197110, Russia

³ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia

The observed changes in the Earth's climate necessitate monitoring the content of greenhouse gases, primarily CO₂, the main anthropogenic gas. In recent decades, satellite remote sensing has been actively used to monitor the total content of CO₂ and its anthropogenic emission. The paper presents examples of analysis of XCO₂ measurements by the OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) satellite in order to study the spatiotemporal distribution of CO₂ in the vicinity of industrial cities in Russia (16 cities) and estimate its anthropogenic emission. For a number of the cities (Chelyabinsk, Yekaterinburg and Novosibirsk), temporal variations of XCO₂ were studied in detail, and for Chelyabinsk, estimates of anthropogenic CO₂ emission were given using OCO-2 measurements. The seasonal course of XCO₂ in the area of the cities under study is characterized by a maximum in late winter–early spring and a minimum in late summer, which corre-

sponds to the seasonal change in the CO₂ content in other parts of the planet. According to OCO-2 measurements in the cities of Chelyabinsk, Novosibirsk and Yekaterinburg, the range of long-term trends in XCO₂ is 1.9–2.7 ppm/yr. Using OCO-2 measurements of June 5, 2021, CO₂ emission from the territory of Chelyabinsk was estimated at 16 Mt·yr⁻¹ from the territory of the probable source or ~0.9 Mt·yr⁻¹·km⁻². Analysis of anthropogenic CO₂ emission based on the EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) v8.0 inventory databases for 2021 showed that the specific gas emission in the city was ~0.5 Mt·g⁻¹·km⁻².

Keywords: XCO₂ in Russia, anthropogenic CO₂ emission, remote sensing, OCO-2 satellite measurements, long-term trend of XCO₂, CO₂ in industrial cities

Accepted: 15.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-281-289

References

1. Aref'ev V. N., Kamenogradsky N. E., Kashin F. V., Shilkin A. V., Background component of carbon dioxide concentration in the near-surface air, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, V. 50, No. 6, 2014, pp. 576–582, <https://doi.org/10.1134/S0001433814060036>.
2. Timofeev Yu. M., Polyakov A. V., Virolainen Ya. A. et al., Estimates of trends of climatically important atmospheric gases near St. Petersburg, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, V. 56, No. 1, pp. 79–84, <https://doi.org/10.1134/S0001433820010119>.
3. Timofeev Yu. M., Berezin I. A., Virolainen Ya. A. et al., Estimates of anthropogenic CO₂ emissions for Moscow and St. Petersburg based on OCO-2 satellite measurements, *Optika atmosfery i okeana*, 2020, V. 33, No. 4, pp. 261–265 (in Russian), <https://doi.org/10.15372/AOO20200403>.
4. Foka S. Ch., Makarova M. V., Poberovsky A. V., Timofeev Yu. M., Temporal variations in CO₂, CH₄ and CO concentrations in Saint-Petersburg suburb (Peterhof), *Optika atmosfery i okeana*, 2019, V. 32, No. 10, pp. 860–866 (in Russian), <https://doi.org/10.15372/AOO20191010>.
5. Basu S., Houweling S., Peters W. et al., The seasonal cycle amplitude of total column CO₂: Factors behind the model-observation mismatch, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, V. 116, Article D23306, <https://doi.org/10.1029/2011JD016124>.
6. *Climate Change 2013: The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p., <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
7. Gale J., Bradshaw J., Chen Z. et al., Sources of CO₂, In: *IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*, Ch. 2, Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2005, pp. 75–104.
8. Hakkarainen J., Jalongo I., Tamminen J., Direct space-based observations of anthropogenic CO₂ emission areas from OCO, *Geophysical Research Letters*, 2016, V. 43, Iss. 21, pp. 11400–11406, <https://doi.org/10.1002/2016GL070885>.
9. Reuter M., Buchwitz M., Schneising O. et al., Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: co-located regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, V. 19, pp. 9371–9383, <https://doi.org/10.5194/acp-19-9371-2019>.
10. Reißmann M., Chen J., Osterman G. et al., Comparison of OCO-2 target observations to MUCCnet — is it possible to capture urban X_{CO₂} gradients from space?, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, V. 15, pp. 6605–6623, <https://doi.org/10.5194/amt-15-6605-2022>.
11. Uspensky A. B., Atmospheric greenhouse gas distributions: Satellite-based measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, V. 59, Iss. Suppl. 2, pp. S232–S241, <https://doi.org/10.1134/S0001433823140141>.
12. Wunch D., Wennberg P. O., Osterman G. et al., Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) X_{CO₂} measurements with TCCON, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, V. 10, pp. 2209–2238, <https://doi.org/10.5194/amt-10-2209-2017>.
13. Yang E. G., Kort E. A., Wu D. et al., Using space-based observations and Lagrangian modeling to evaluate urban carbon dioxide emissions in the Middle East, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, V. 125, Article e2019JD031922, <https://doi.org/10.1029/2019JD031922>.