

Спутниковая оценка антропогенных выбросов диоксида серы на примере некоторых территорий России

Н. В. Родионова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия
E-mail: rnv1948123@yandex.ru

Сделана оценка сезонных и межгодовых вариаций содержания диоксида серы в столбе атмосферы по измерениям прибора OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) спутника Aura с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ для периода 2005–2024 гг. на базе использования системы Giovanni и оценка антропогенных выбросов SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT v5.3 онлайн-сервиса ECCAD (*англ.* Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data), доступного для сетки с пространственным разрешением $0,1 \times 0,1^\circ$ для периода 2000–2023 гг., на примере нескольких городов России. Выбор территорий (Норильск, Рефтинский, Карабаш, Челябинск, Донецк, Луганск) обусловлен повышенными антропогенными выбросами SO_2 по данным кадастра CAMS-GLOB-ANT и спутниковыми данными. Проведено сравнение данных кадастра о выбросах диоксида серы и спутниковых данных о содержании SO_2 в столбе атмосферы. Как по кадастру, так и по спутниковым данным объём выбросов и содержание SO_2 в атмосфере снижается в летний сезон. В ряде случаев спутниковые оценки эмиссии не согласуются с кадастром.

Ключевые слова: диоксид серы, спутниковые измерения, антропогенные выбросы

Одобрена к печати: 16.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-333-342

Введение

Диоксид серы (SO_2) — это токсичный газ, продукт сгорания серы или горючих материалов, её содержащих. Основными источниками диоксида серы выступают природные объекты — вулканы и антропогенные — угольные электростанции, предприятия цветной промышленности и нефтеперерабатывающие заводы. Основное использование SO_2 — в производстве серной кислоты. В пищевой промышленности применяется в качестве консерванта (E220).

В атмосфере Земли SO_2 содержится в малых количествах порядка 15 ppb (*англ.* parts per billion). В атмосфере Венеры концентрация SO_2 составляет 150 ppm (*англ.* parts per million). Вступая в реакцию с водой, образует облака серной кислоты, способствует глобальному потеплению ([https://ru.wikipedia.org/wiki/Оксид_серы\(IV\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Оксид_серы(IV))).

Окисление диоксида серы приводит к образованию серной кислоты (H_2SO_4) и мелкодисперсных твёрдых частиц, которые связаны с негативными последствиями для здоровья, такими как дыхательные и сердечно-сосудистые заболевания, и экологическим воздействием на почву, лес и пресную воду (кислотные дожди). Диоксид серы классифицируется как загрязнитель воздуха 3-го класса опасности. Время жизни диоксида серы в нижней атмосфере 1–3 дня (Дрюкова и др., 2023; Beirle et al., 2014; Fioletov et al., 2015; Lee et al., 2011).

В настоящей работе сделана оценка содержания диоксида серы в столбе атмосферы по измерениям прибора OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) спутника Aura с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ для периода 2005–2024 гг. на базе использования системы Giovanni (giovannt.gsfc.nasa.gov) и оценка антропогенных выбросов SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT v5.3 онлайн-сервиса ECCAD (*англ.* Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data), доступного для сетки с пространственным разрешением $0,1 \times 0,1^\circ$ для периода 2000–2023 гг., на примере нескольких городов России (Норильск, Рефтинский, Карабаш, Челябинск, Донецк, Луганск). Выбор территорий обусловлен повышенными антропогенными выбросами SO_2 по данным кадастра CAMS-GLOB-ANT и спутниковыми данными.

Выбор исследуемых территорий

Выбранные территории (Норильск, Рефтинский, Карабаш, Челябинск, Донецк, Луганск) входят в глобальный каталог крупных антропогенных и природных источников выбросов SO_2 , полученных в результате спутниковых измерений. Первая версия каталога (Fioletov et al., 2016) содержит информацию о 491 постоянно действующем точечном источнике диоксида серы: вулканы, электростанции, плавильные заводы, нефтегазовая промышленность. Вторая версия каталога (Fioletov et al., 2023) включает 588 источников и доступна на сайте <https://so2.gsfc.nasa.gov/measures.html>. Во вторую версию каталога входят более 50 источников на территории России, из них 11 природных — вулканы Камчатки.

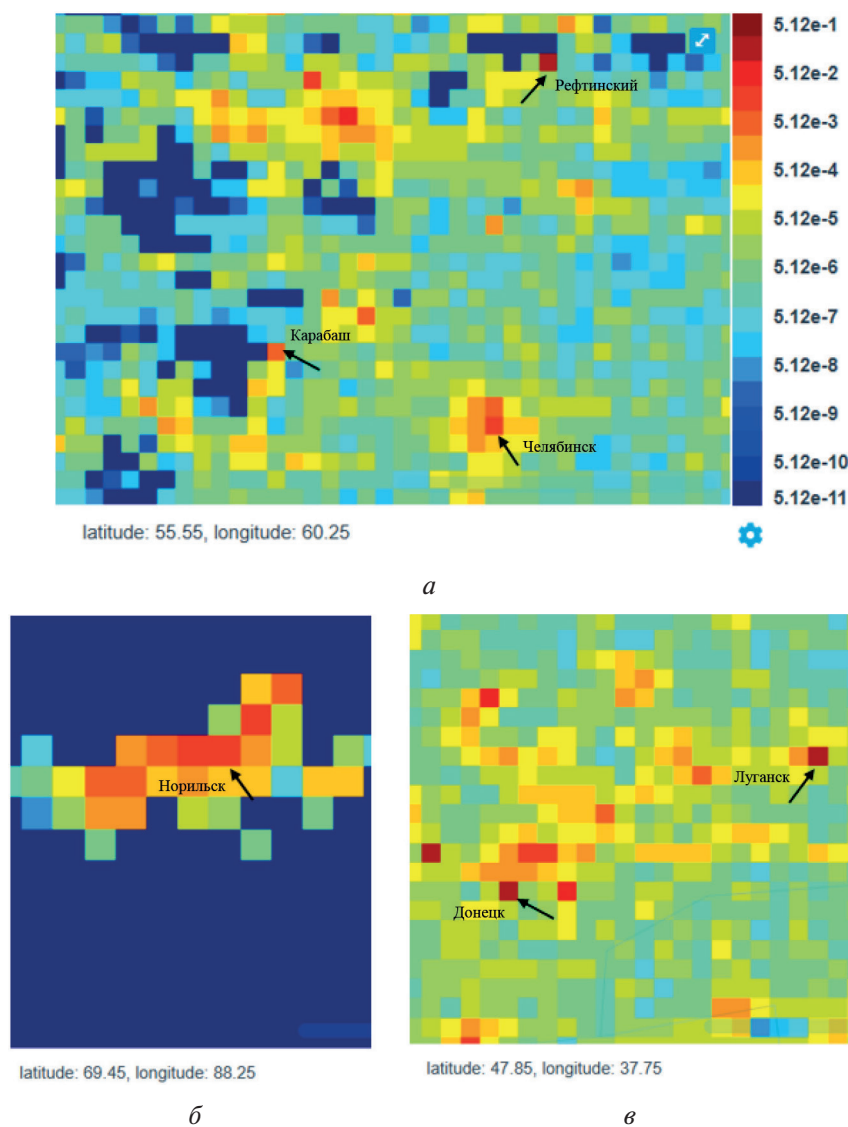


Рис. 1. Карта антропогенных выбросов SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT со шкалой измерений в тераграмм в год ($\text{Tg}/\text{год}$, $1\text{Tg} = 10^6\text{ т}$, Tg — мегатонна) (стрелки указывают на ячейки выбранных территорий). Latitude — широта, longitude — долгота

На карте антропогенных выбросов SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT онлайн-сервиса ECCAD (<http://eccad.aeris-data.fr>) выбранные территории выделались как области с повышенными выбросами диоксида серы (ячейки сетки бордового цвета (рис. 1)). На рис. 1а стрелкой обозначены три ячейки с городами Карабашом ($55,55^\circ$ с. ш., $60,25^\circ$ в. д.),

Челябинском (55,15° с. ш., 61,43° в. д.) и Рефтинским (57,14° с. ш., 61,75° в. д.). На *рис. 1б* стрелкой отмечена ячейка с городом Норильском (69,46° с. ш., 88,24° в. д.) и на *рис. 1в* выделены стрелкой города Донецк (47,85° с. ш., 37,74° в. д.) и Луганск (48,58° с. ш., 39,34° в. д.). В нижней части каждого из фрагментов карты даны координаты одной из выбранных ячеек, так, на фрагменте *а* — это координаты Карабаша, на фрагменте *б* — координаты Норильска и на фрагменте *в* — координаты Донецка.

Среди рассматриваемых территорий Норильск считается крупнейшим источником антропогенных выбросов SO₂ не только в России, но и в мире (Дрюкова и др., 2023; Зуев, 2018; Зуев, Кашкин, 2013; Bauduin et al., 2014; Fioletov et al., 2016, 2023). Диоксид серы, образуемый в процессах переработки сульфидных руд Талнаха Норильского рудного района, — главный загрязнитель воздуха в Норильске. Заполярный филиал «Норникеля» — огромное и мощное предприятие, которое не только обеспечивает 70 % общероссийского производства никеля и 40 % меди, но также представляет один из крупнейших загрязнителей, выдавая примерно 30 % всех выбросов диоксида серы в цветной металлургии. К сожалению, из-за специфики руд норильских месторождений на сегодняшний день пирометаллургия видится единственным реальным металлургическим процессом, обеспечивающим наиболее полное извлечение ценных металлов. То есть руду необходимо подвергать воздействию высокой температуры, в результате чего в атмосферу и поступает диоксид серы (<https://www.vnedra.ru/tehnologii/gips-eto-znachitelno-luchshe-chem-vybrosy-dioksida-sery-23593/>).

Рефтинский (посёлок городского типа Свердловской области) известен Рефтинской газотурбинной электростанцией, которая представляется крупнейшей тепловой электростанцией в России, работающей на твёрдом топливе.

«Карабашмедь» — один из старейших и самых больших медеплавильных заводов в России (основан в 1910 г.). Отсутствие модернизации оборудования на протяжении долгих лет привело к экологической катастрофе и признанию Карабаша и прилегающих территорий в 1996 г. зоной экологического бедствия. Окрестности комбината практически лишились растительности из-за выбросов SO₂, которые выпадают на город в виде кислотных дождей (Kalabin, Moiseenko, 2011). В 85 км от Карабаша расположен Челябинск, и хвост из газовых выбросов «Карабашмеди» легко достаёт город (<http://worldcrisis.ru/crisis/2359194>). На предприятии «Карабашмедь» с 2019 г. ведутся значительные работы по реконструкции и сокращению выбросов SO₂.

Донецк и Луганск, столицы Донецкой и Луганской народных республик, вошедших в РФ в 2022 г., как и Запорожская и Херсонская области, с мая 2014 г. подвергались бомбардировкам со стороны Украины с применением тяжёлой бронетехники и авиации. Выбросы диоксида серы для этих территорий связаны не только с деятельностью промышленности и энергетики, но и с военными действиями. Основными загрязнителями атмосферы из-за взрывов боеприпасов оказываются газообразные компоненты CO, CO₂, SO₂, NO₂ и твёрдые продукты в виде сажи и некоторых солей (<https://restrajjectory.ru/9-4.pdf>).

Наборы данных

Промышленные источники выбросов SO₂ впервые были обнаружены из космоса с помощью измерений в ультрафиолетовой части спектра прибором GOME (*англ.* Global Ozone Monitoring Experiment) на космическом аппарате ERS-2 (*англ.* European Remote Sensing satellite). В дальнейшем использовались спектрометры на спутниках Envisat (инфракрасный диапазон) и MetOp-A (*англ.* Meteorological Operational satellite) (инфракрасный диапазон). Новая эра спутниковых измерений SO₂ началась с запуском в 2004 г. американского космического аппарата Aura с прибором OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument), обладавшим в то время наилучшим пространственным разрешением до 13×24 км (Fioletov et al., 2023).

В настоящей работе использовались данные OMI/Aura (Levelt et al., 2006) SO₂ Column Amount Daily (ежесуточное суммарное содержание в атмосферном столбе), наземное пространственное разрешение 0,25°, период 2005–2024 гг., доступные на сайте <https://giovanni>.

gsfc.nasa.gov/giovanni/. Спектрометр OMI работает в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах 264–504 нм. Данные OMI SO₂ представлены в единицах Добсона (DU) (1 DU = 2,69·10¹⁶ молекул/см²). Отметим, что при обработке данных была проведена их фильтрация, а именно: а) отрицательные значения SO₂ исключались (отрицательные значения могут возникать при ясном небе или низком уровне SO₂ относительно принятого порога); б) при количестве значащих значений в месяц меньше трёх, данные этого месяца не учитывались (связано с недостатком солнечного освещения и условиями облачности) (Fioletov et al., 2015). При определении межгодовых вариаций концентрации SO₂ в столбе атмосферы учитывались месяцы с марта по сентябрь.

Оценка антропогенных выбросов SO₂ сделана на основе сервиса ECCAD (Bessagnet et al., 2011). Сервис ECCAD разработан как часть французского портала AERIS (<http://www.aeris-data.fr>), который предоставляет в открытом доступе информацию о различных продуктах, связанных с науками об атмосфере, таких как наземные, спутниковые наблюдения, лабораторная и спектроскопическая информация, инструменты моделирования и выбросы с поверхности. В онлайн-сервисе ECCAD в категорию антропогенных входят девять проектов, каждый из которых включает в себя несколько баз данных. В настоящей работе использовалась база данных CAMS-GLOB-ANT, входящая в проект CAMS (англ. Copernicus Atmosphere Monitoring Service) (шесть баз данных) с пространственным разрешением 0,1×0,1° для периода 2000–2023 гг. В CAMS-GLOB-ANT v5.3 доступна информация о многовременных вариациях 36 параметров (CO, CH₄ и т.д.) и 21 секторе. Пространственное разрешение 0,1×0,1° соответствует размеру ячейки сетки на широте Москвы 11,1×6,2 км.

Оценка антропогенных выбросов SO₂ по данным кадастра CAMS-GLOB-ANT и содержания диоксида серы в атмосфере по данным OMI

На рис. 2 показан годовой объём выбросов SO₂ по сумме секторов (в кт в год) по данным кадастра CAMS-GLOB-ANT за период 2000–2024 гг. для шести городов России (в пределах ячейки сетки размером 0,1×0,1°).

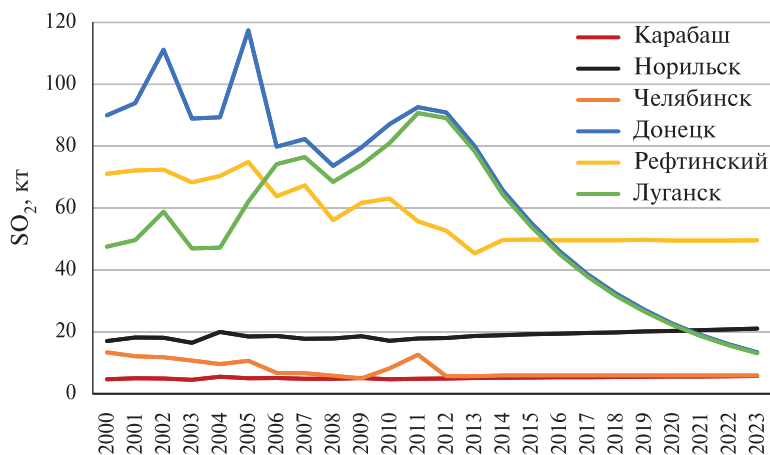


Рис. 2. Годовые антропогенные выбросы двуокиси серы по сумме секторов для некоторых городов России на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT

Для Рефтинского, Челябинска, Донецка и Луганска практически 100 % антропогенных выбросов SO₂ связаны с энергетическим сектором, для Норильска и Карабаша — с промышленным. Резкий спад выбросов SO₂ в Донецке и Луганске после 2012 г. возможно связан со сложностями получения информации о деятельности предприятий энергетики на данных территориях в непростое время. Среди «старых» российских территорий по выбросам SO₂ лидирует Рефтинский, меньше выбросы SO₂ в Норильске (от 2,5 раз и более).

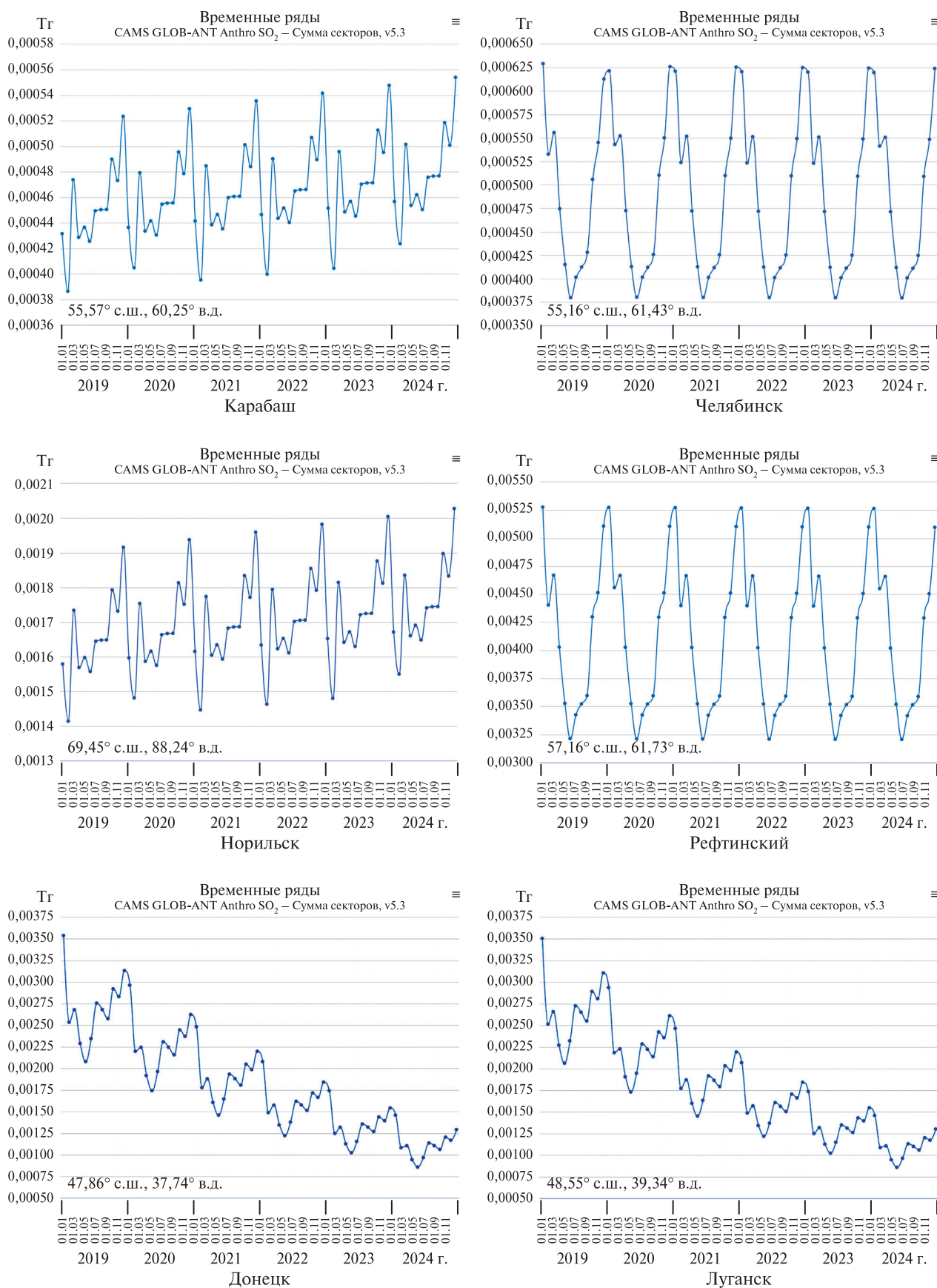


Рис. 3. Вариации антропогенных выбросов двуокиси серы по сумме секторов за 6 лет от 01.01.2019 по 01.11.2024 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT

Выбросы в Карабаше и Челябинске в четыре раза меньше, чем в Норильске. Для Карабаша и Норильска отмечаем положительный тренд (коэффициент детерминации $R^2 = 0,62$) в объёме антропогенных выбросов SO_2 . Для остальных территорий есть отрицательный тренд (для Рефтинского $R^2 = 0,8$, для Челябинска $R^2 = 0,53$), что отчётливо прослеживается на *рис. 3* (см. с. 337), где приведены графики вариаций антропогенных выбросов двуокиси серы по сумме секторов по месяцам за 6 лет от 01.01.2019 до 01.11.2024 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT v.5.3.

Сезонные антропогенные выбросы диоксида серы на примере 2024 г. показаны на *рис. 4*. График для Рефтинского приведён со вспомогательной шкалой (пунктирная линия). График для Луганска не представлен, поскольку практически не отличается от графика для Донецка. Отмечаем максимум выбросов в зимние месяцы и минимум в летние месяцы.

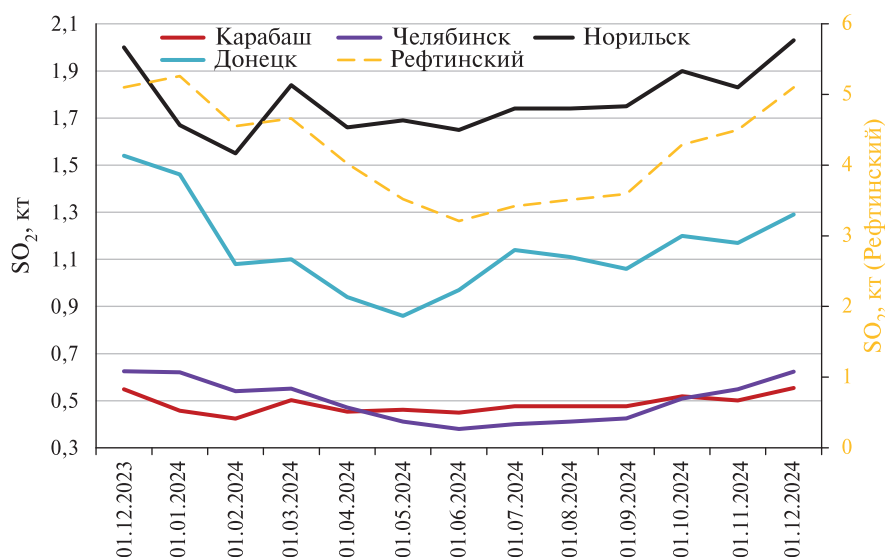


Рис. 4. Сезонные антропогенные выбросы SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT

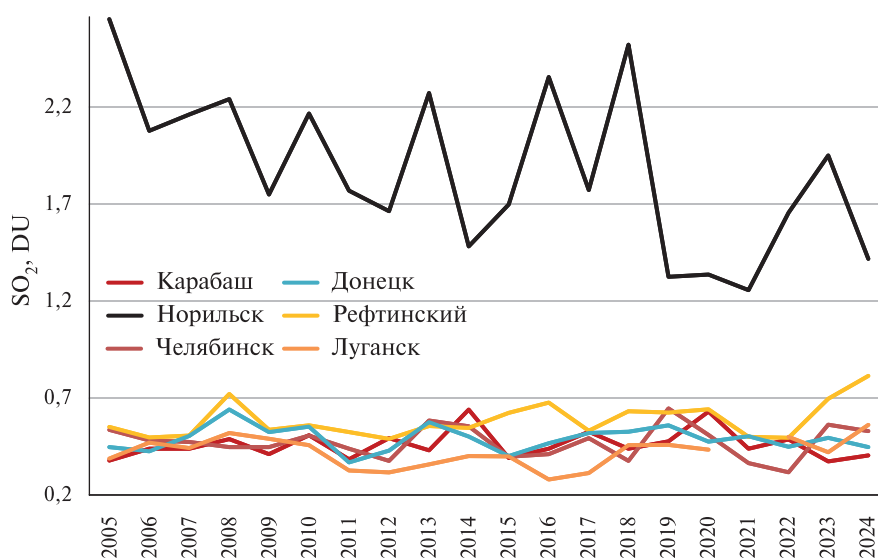


Рис. 5. Межгодовые вариации содержания SO_2 в столбе атмосферы

На *рис. 5* приведены графики содержания SO_2 в столбе атмосферы, основанные на измерениях OMI, при усреднении значений за март–сентябрь. Спутниковая оценка показала превосходящее в разы содержание SO_2 в столбе атмосферы для Норильска относительно

других территорий (4,8–7,0 раз в 2005 г. с уменьшением к 2024 г. до 1,7–3,5 раза). Отметим отрицательный тренд в содержании SO_2 в столбе атмосферы для Норильска ($R^2 = 0,31$), Челябинска и Донецка (для этих городов R^2 порядка 0), для остальных территорий — слабый положительный тренд (Рефтинский — $R^2 = 0,18$, для Луганска и Карабаша R^2 порядка 0).

Сезонные вариации содержания SO_2 в столбе атмосферы по данным ОМІ показаны на графиках *рис. 6*. Планки погрешностей на графиках даны для Норильска и Рефтинского (для Карабаша, Челябинска, Донецка и Луганска значения стандартного отклонения меньше, чем у Рефтинского). Прослеживается снижение содержания SO_2 в атмосфере в летний сезон для всех территорий (в разной степени выраженности).

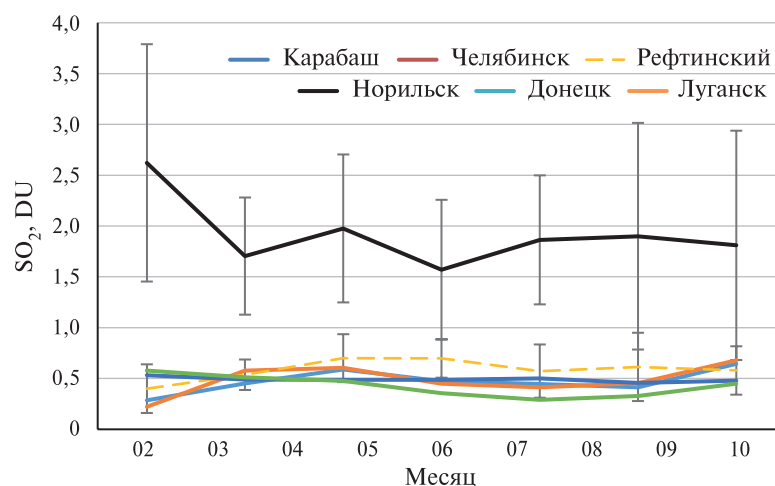


Рис. 6. Сезонные вариации содержания SO_2 в столбе атмосферы по данным ОМІ

Сравнение данных кадастра по антропогенным выбросам диоксида серы и спутниковых данных о содержании SO_2 в столбе атмосферы показало следующее:

1. По кадастру антропогенные выбросы SO_2 для Донецка и Луганска существенно упали с 90 кт/год в 2012 г. до 13 кт/год в 2023 г. (см. *рис. 2*), что не прослеживается по спутниковым измерениям (см. *рис. 5*). По данным ОМІ для Донецка и Луганска для этого периода тренд в содержании SO_2 в атмосфере практически отсутствует. Такое различие в данных кадастра и спутника возможно связано со сложностью получения информации о функционировании предприятий в условиях сложной обстановки.
2. По данным кадастра антропогенные выбросы SO_2 в Рефтинском превышают выбросы в Норильске (см. *рис. 2*), тогда как по данным ОМІ содержание SO_2 в столбе атмосферы для Норильска значительно больше, чем для Рефтинского и остальных территорий (см. *рис. 5*).
3. Для Карабаша и Норильска по кадастру отмечаем положительный тренд в выбросах SO_2 ($R^2 = 0,62$) (см. *рис. 2*), по данным ОМІ для Норильска — отрицательный тренд в содержании SO_2 в столбе атмосферы ($R^2 = 0,31$) (см. *рис. 5*).
4. Для Карабаша и Челябинска данные кадастра и ОМІ не противоречат друг другу.
5. Сезонные вариации выбросов диоксида серы по кадастру согласуются со спутниковыми данными содержания SO_2 в столбе атмосферы (см. *рис. 4* и *б*) об уменьшении выбросов и снижении содержания SO_2 в атмосфере в летний сезон.

Заключение

Для нескольких городов России сделана оценка содержания диоксида серы в столбе атмосферы по измерениям прибора ОМІ спутника Aura с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ для периода 2005–2024 гг. и оценка антропогенных выбросов SO_2 на основе ка-

дастра CAMS-GLOB-ANT v5.3 онлайн-сервиса ECCAD, доступного для сетки с пространственным разрешением $0,1 \times 0,1^\circ$ для периода 2000–2023 гг., на примере нескольких городов России. Выбор территорий (Норильск, Рефтинский, Карабаш, Челябинск, Донецк, Луганск) обусловлен повышенными антропогенными выбросами SO_2 по данным кадастра CAMS-GLOB-ANT и спутниковыми данными.

По данным кадастра для Рефтинского, Челябинска, Донецка и Луганска практически 100 % антропогенных выбросов SO_2 связаны с энергетическим сектором, для Норильска и Карабаша — с промышленным.

Сравнение данных кадастра по выбросам диоксида серы и спутниковых данных о содержании SO_2 в столбе атмосферы показало следующее:

1. Спутниковая оценка демонстрирует превосходящее в разы содержание SO_2 в столбе атмосферы для Норильска относительно других территорий (в 2005 г. в 4,8–7,0 раз с уменьшением к 2024 г. до 1,7–3,5 раза). По данным кадастра годовые выбросы SO_2 в Рефтинском превышают выбросы в Норильске от 2 до 4 раз.

В ряде случаев спутниковые оценки эмиссии не согласуются с кадастром, причём кадастр показывает значительно меньшую общую эмиссию (Dammers et al., 2019). В работе (Fioletov et al., 2016) предлагается использовать каталог эмиссии SO_2 для проверки кадастров выбросов диоксида серы и обратно для валидации результатов анализа данных ОМІ по SO_2 при наличии надёжных данных кадастров о выбросах SO_2 .

2. По кадастру антропогенные годовые выбросы SO_2 в Донецке и Луганске существенно снизились с 90 кт/год в 2012 г. до 13 кт/год в 2023 г., что не прослеживается по спутниковым измерениям. Такое различие в данных кадастра и спутника возможно связано со сложностью получения информации о функционировании предприятий в условиях сложной обстановки.
3. Для Карабаша и Челябинска данные кадастра и ОМІ не противоречат друг другу. Для Карабаша как по данным кадастра, так и ОМІ отмечается большее содержание SO_2 в атмосфере, чем для Челябинска.
4. Как по кадастру, так и по спутниковым данным объём выбросов и содержание SO_2 в атмосфере снижается в летний сезон.

Следует отметить, что разные кадастры могут предоставлять разную информацию о выбросах загрязняющих веществ для одной и той же территории. Причины могут быть такие (Bessagnet et al., 2011): а) данные о деятельности и подробные сведения о факторах выбросов, которые используются для составления кадастров, как правило, не предоставляются вместе с кадастрами; б) кадастры выбросов регулярно обновляются с применением самых последних данных о деятельности и коэффициентах выбросов, что может привести к значительным различиям между разными версиями одного кадастра; в) каждый набор данных отличается способом их обработки и подготовки к расчётам. Такая информация либо не предоставляется, либо её довольно сложно оценить, если она есть.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

Литература

1. Дрюкова Е. Д., Неробелов Г. М., Седева М. С. и др. Анализ природы повышенных содержаний диоксида серы в приземном воздухе северной части Финляндии при помощи спутникового мониторинга и математического моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 4. С. 450–460. DOI: 10.31857/S0002351523040041.
2. Зуев Д. В. Спутниковый мониторинг выбросов диоксида серы техногенных объектов северных территорий Красноярского края: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2018. 147 с.
3. Зуев Д. В., Кашкин В. Б. Анализ выбросов диоксида серы по данным инструмента ОМІ (спутник Aura) для Норильской промышленной зоны // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 9. С. 793–797.

4. *Bauduin S., Clarisse L., Clerbaux C. et al.* IASI observations of sulfur dioxide (SO₂) in the boundary layer of Norilsk // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. V. 119. P. 4253–4263. DOI: 10.1002/2013JD021405.
5. *Beirle S., Hörmann C., Penning de Vries M. et al.* Estimating the volcanic emission rate and atmospheric lifetime of SO₂ from space: a case study for Kīlauea volcano, Hawai’I // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. V. 14. P. 8309–8322. <https://doi.org/10.5194/acp-14-8309-2014>.
6. *Bessagnet C. B., Bond T., D’Angiola A. et al.* Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period // *Climatic Change*. 2011. V. 109. P. 163–190. DOI: 10.1007/s10584-011-0154-1.
7. *Dammers E., McLinden C. A., Griffin D. et al.* NH₃ emissions from large point sources derived from CrIS and IASI satellite observations // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. P. 12261–12293. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12261-2019>.
8. *Fioletov V. E., McLinden C. A., Krotkov N., Li C.* Lifetimes and emissions of SO₂ from point sources estimated from OMI // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. P. 1969–1976. DOI: 10.1002/2015GL063148.
9. *Fioletov V. E., McLinden C. A., Krotkov N. et al.* A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*. 2016. 45 p. DOI: 10.5194/acp-2016-417.
10. *Fioletov V. E., McLinden C. A., Griffin D. et al.* Version 2 of the global catalogue of large anthropogenic and volcanic SO₂ sources and emissions derived from satellite measurements // *Earth System Science Data*. 2023. V. 15. P. 75–93. <https://doi.org/10.5194/essd-15-75-2023>.
11. *Kalabin G. V., Moiseenko T. I.* Ecodynamics of anthropogenic mining provinces: From degradation to rehabilitation // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 437. Iss. 1. P. 432–436. DOI: 10.1134/S1028334X1103024X.
12. *Lee C., Martin R. V., van Donkelaar A. et al.* SO₂ emissions and lifetimes: Estimates from inverse modeling using in situ and global, space-based (SCIAMACHY and OMI) observations // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. V. 116. Article D06304. <https://doi.org/10.1029/2010JD014758>.
13. *Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Dobber M. R. et al.* The ozone monitoring instrument // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2006. V. 44. P. 1093–1101. DOI: 10.1109/TGRS.2006.872333.

Satellite assessment of anthropogenic sulfur dioxide emissions in some Russian territories

N. V. Rodionova

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia
E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

The seasonal and interannual variations of sulfur dioxide content in the troposphere column were estimated from measurements of the OMI (Ozone Monitoring Instrument) instrument of the Aura satellite with a spatial resolution (SR) of 0.25×0.25° for the period 2005–2024 using the Giovanni system, and the assessment of anthropogenic SO₂ emissions based on the CAMS-GLOB-ANT v5.3 inventory of the ECCAD (Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data) online service available for grids with SR of 0.1×0.1° for the period 2000–2023, using the example of several Russian cities. The choice of the territories (Norilsk, Reftinsky, Karabash, Chelyabinsk, Donetsk, and Lugansk) is based on the increased anthropogenic emissions of SO₂ according to the CAMS-GLOB-ANT inventory data and satellite data. A comparison was made between the inventory data on sulfur dioxide emissions and the satellite data on SO₂ content in the atmospheric column. Both the inventory data and the satellite data show a decrease in emissions and SO₂ content in the atmosphere during the summer season. In some cases, the satellite estimates of emissions do not agree with the inventory data.

Keywords: sulfur dioxide, satellite measurements, anthropogenic emissions

Accepted: 16.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-333-342

References

1. Dryukova E. D., Nerobelov G. M., Sedeeva M. S. et al., Integration of satellite monitoring and mathematical modeling in the analysis of the nature of elevated sulfur dioxide concentrations in the surface air of the northern part of Finland, *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2023, V. 59, s No. 4, pp. 450–460 (in Russian), DOI: 10.31857/S0002351523040041.
2. Zuev D. V., *Sputnikovyi monitoring vybrosov dioksida sery tekhnogennykh ob"ektov severnykh territorii Krasnoyarskogo kraya: Dis. ... kand. tekhn. nauk* (Satellite monitoring of sulfur dioxide emissions from industrial facilities in the northern territories of Krasnoyarsk Krai, Cand. techn. sci. thesis), Krasnoyarsk, 2018, 147 p. (in Russian).
3. Zuev D. V., Kashkin V. B., Analysis of sulfur dioxide emissions above Norilsk industrial area using AURA satellite data, *Optika atmosfery i okeana*, 2013, V. 26, No. 9, pp. 793–797 (in Russian).
4. Bauduin S., Clarisse L., Clerbaux C. et al., IASI observations of sulfur dioxide (SO₂) in the boundary layer of Norilsk, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, V. 119, pp. 4253–4263, DOI: 10.1002/2013JD021405.
5. Beirle S., Hörmann C., Penning de Vries M. et al., Estimating the volcanic emission rate and atmospheric lifetime of SO₂ from space: a case study for Kīlauea volcano, Hawai'i, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, V. 14, pp. 8309–8322, <https://doi.org/10.5194/acp-14-8309-2014>.
6. Bessagnet C. B., Bond T., D'Angiola A. et al., Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period, *Climatic Change*, 2011, V. 109, pp. 163–190, DOI: 10.1007/s10584-011-0154-1.
7. Dammers E., McLinden C. A., Griffin D. et al., NH₃ emissions from large point sources derived from CrIS and IASI satellite observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Iss. 19, pp. 12261–12293, <https://doi.org/10.5194/acp-19-12261-2019>.
8. Fioletov V. E., McLinden C. A., Krotkov N., Li C., Lifetimes and emissions of SO₂ from point sources estimated from OMI, *Geophysical Research Letters*, 2015, V. 42, pp. 1969–1976, DOI: 10.1002/2015GL063148.
9. Fioletov V. E., McLinden C. A., Krotkov N. et al., A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 2016, 45 p., DOI: 10.5194/acp-2016-417.
10. Fioletov V. E., McLinden C. A., Griffin D. et al., Version 2 of the global catalogue of large anthropogenic and volcanic SO₂ sources and emissions derived from satellite measurements, *Earth System Science Data*, 2023, V. 15, pp. 75–93, <https://doi.org/10.5194/essd-15-75-2023>.
11. Kalabin G. V., Moiseenko T. I., Ecodynamics of anthropogenic mining provinces: From degradation to rehabilitation, *Doklady Earth Sciences*, 2011, V. 437, Iss. 1, pp. 432–436, DOI: 10.1134/S1028334X1103024X.
12. Lee C., Martin R. V., van Donkelaar A. et al., SO₂ emissions and lifetimes: Estimates from inverse modeling using in situ and global, space based (SCIAMACHY and OMI) observations, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, V. 116, Article D06304, <https://doi.org/10.1029/2010JD014758>.
13. Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Dobber M. R. et al., The ozone monitoring instrument, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, V. 44, pp. 1093–1101, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872333.