

Спутниковая оценка антропогенных выбросов диоксида серы на примере некоторых территорий России

Родионова Н.В.

**Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, МО
rnv1948123@yandex.ru*



ВВЕДЕНИЕ



Диоксид серы (SO_2) - это продукт сгорания серы или горючих материалов, ее содержащих. Диоксид серы токсичный газ с запахом пороха. Основными источниками диоксида серы являются природные- вулканы и антропогенные- угольные электростанции, плавильные и нефтеперерабатывающие заводы. Основное использование SO_2 – в производстве серной кислоты. В пищевой промышленности используется в качестве консерванта (E220).

В атмосфере Земли SO_2 содержится в малых количествах порядка 15 ppb (15 частей на миллиард). В атмосфере Венеры концентрация SO_2 составляет 150 ppm (150 частей на миллион). Вступая в реакцию с водой, образует облака серной кислоты, способствует глобальному потеплению (https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.d5c56e7e-689dc19f-1afd1ff8-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_dioxide).

Окисление диоксида серы приводит к образованию серной кислоты (H_2SO_4) и мелкодисперсных твердых 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 класса опасности. Время жизни диоксида серы в нижней атмосфере - $1 \div 3$ дня (Lee et al., 2011; Beirle et al., 2014; Fioletov et al., 2015; Дрюкова и др., 2023).

В данной работе сделана оценка содержания диоксида серы в столбе тропосферы по измерениям прибора ОМІ спутника Aura с пространственным разрешением (ПР) $=0.25^\circ \times 0.25^\circ$ для периода 2005-2024 гг. на базе использования системы Giovanni (giovannnt.gsfc.nasa.gov) и оценка антропогенных выбросов SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT v5.3 онлайн сервиса ECCAD для сетки с ПР $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ для периода 2000-2023 гг. на примере нескольких городов России (Норильск, Рефтинский, Карабаш, Челябинск, Донецк, Луганск). Выбор территорий связан с повышенными антропогенными выбросами SO_2 по данным кадастра CAMS-GLOB-ANT и спутниковыми данными.



ВЫБОР ИССЛЕДУЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ

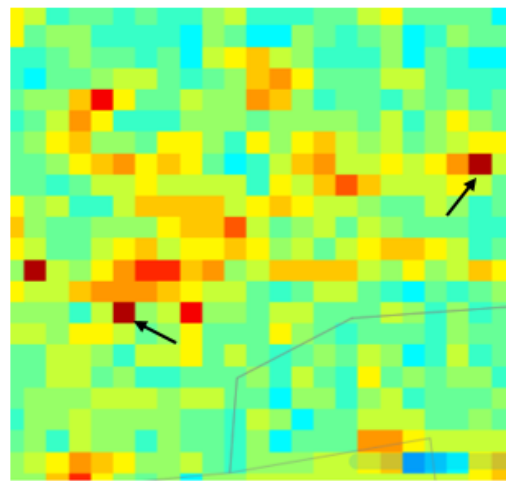
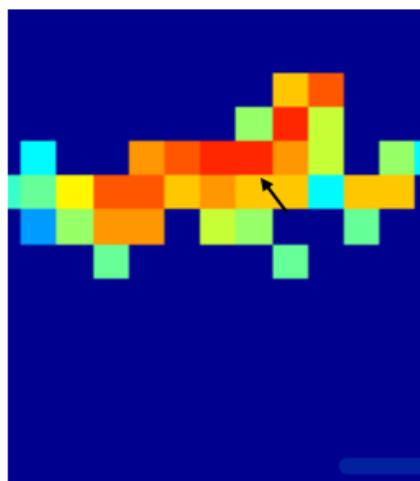
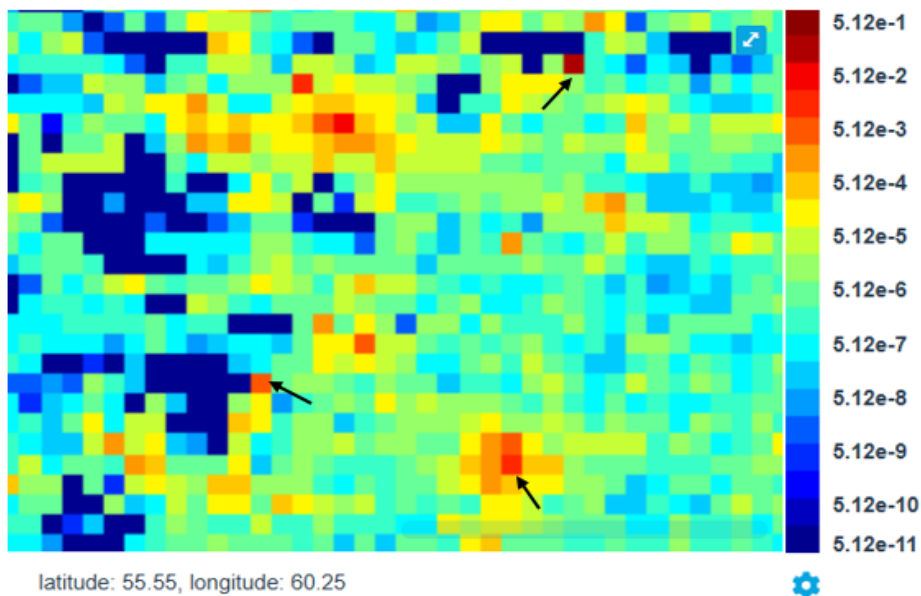


Рис. 1. Карта антропогенных выбросов SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT

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 (Fioletov et al., 2016; 2023) (<https://so2.gsfc.nasa.gov/measures.html>).

На карте антропогенных выбросов SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT онлайн сервисе ECCAD (<http://eccad.aeris-data.fr>) выбранные территории выделились как области с повышенными выбросами диоксида серы (ячейки сетки бордового цвета (рис.1)). На верхнем фрагменте карты выделены стрелкой три ячейки с городами Карабаш (55.55° N , 60.25° E), Челябинск (55.15° N , 61.43° E) и Рефтинский (57.14° N , 61.75° E). На нижнем (слева) стрелкой выделена ячейка с городом Норильск (69.46° N , 88.24° E) и на нижнем (справа) фрагменте выделены стрелкой города Донецк (47.85° N , 37.74° E) и Луганск (48.58° N , 39.34° E). В нижней части каждого из фрагментов карты даны координаты одной из выбранных ячеек, так в верхнем фрагменте- координаты Карабаша, на нижнем (слева) - Норильска и на нижнем (справа) Донецка.



ВЫБОР ИССЛЕДУЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ



Среди рассматриваемых территорий Норильск является крупнейшим источником антропогенных выбросов SO_2 не только в России, но и в мире (Зуев, Кашкин, 2013; Зуев, 2018; Дрюкова и др., 2023; Vauduin et al., 2014; Fioletov et al., 2016, 2023). Диоксид серы, образуемый в процессах переработки сульфидных руд Талнаха, — главный загрязнитель воздуха в Норильске. К сожалению, из-за специфики руд норильских месторождений на сегодняшний день пирометаллургия является единственным реальным металлургическим процессом, обеспечивающим наиболее полное извлечение ценных металлов. То есть руду необходимо подвергать воздействию высоких температур, в результате чего в атмосферу и поступает диоксид серы (<https://www.vnedra.ru/tehnologii/gips-eto-znachitelno-luchshe-chem-vybrosy-dioksida-sery-23593/>).

Рефтинский (поселок городского типа Свердловской области) известен Рефтинской ГРЭС (газотурбинная электростанция), которая является крупнейшей тепловой электростанцией в России, работающей на твердом топливе.

‘Карабашмедь’ — один из старейших (основан в 1910 году) и самых больших медеплавильных заводов в России. Отсутствие модернизации оборудования на протяжении долгих лет привело к экологической катастрофе и признанию Карабаша и прилегающих территорий в 1996 году зоной экологического бедствия. Окрестности комбината практически лишились растительности из-за выбросов SO_2 , которые выпадают на город в виде кислотных дождей (<https://ru.wikipedia.org/wiki/Карабашмедь>). В 85 км от Карабаша расположен Челябинск, и хвост из газовых выбросов ‘Карабашмеди’ легко достает город (<http://worldcrisis.ru/crisis/2359194>).

Донецк и Луганск, столицы Донецкой и Луганской народных республик, вошедших в РФ в 2022 году, как и Запорожская и Херсонская области, с мая 2014 года подвергались бомбардировкам со стороны Украины с применением тяжелой 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 являются газообразные компоненты CO , CO_2 , SO_2 , NO_2 и твердые продукты в виде сажи и некоторых солей (<https://restrajectory.ru/9-4.pdf>).



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 x 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 3, данные этого месяца не учитывались (связано с недостатком солнечного освещения и условий облачности), (в)- значения, превышающие порог 15 DU, исключались (Fioletov, 2015).

Оценка антропогенных выбросов SO₂ сделана на основе сервиса ECCAD (Emissions of atmospheric Compounds & Compilation of Ancillary Data) (<http://eccad.aeris-data.fr>) (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 9 проектов, каждый из которых включает в себя несколько баз данных. В настоящей работе использовалась база данных CAMS-GLOB-ANT, входящая в проект CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) (6 баз данных) с ПР 0.1°x0.1° 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°x0.1° соответствует размеру ячейки сетки на широте Москвы 11.1 км*6.2 км.



ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ SO_2 ПО ДАННЫМ КАДАСТРА CAMS-GLOB-ANT



На рисунке 2 показаны графики годовых объемов выбросов SO_2 по сумме секторов в кт в год (кт - килотонна= 10^3 т) по данным кадастра CAMS-GLOB-ANT за период 2000-2023 гг. для 6 городов России (в пределах ячейки сетки размером $01^\circ \times 0.1^\circ$). На рисунке 3 приведены сезонные вариации выбросов SO_2 для 2023 года (данные для Рефтинского показаны на вспомогательной шкале).

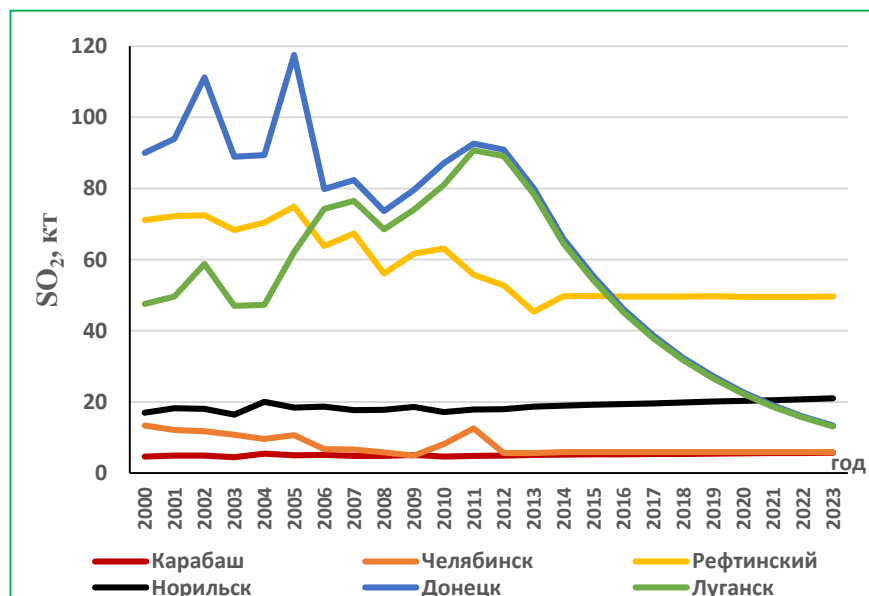


Рис. 2. Годовые антропогенные выбросы двуокиси серы по сумме секторов для некоторых городов России на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT

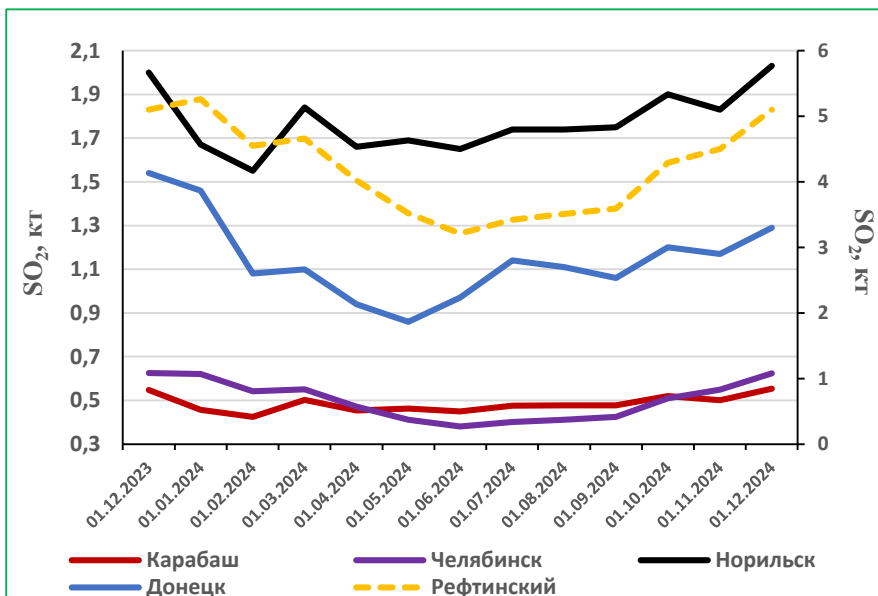


Рис. 3. Сезонные антропогенные выбросы SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT

Для Рефтинского, Челябинска, Донецка и Луганска практически 100% антропогенных выбросов SO_2 связаны с энергетическим сектором, для Норильска и Карабаша – с промышленным. Резкий спад выбросов SO_2 в Донецке и Луганске после 2012 года возможно связан со сложностями получения информации о деятельности предприятий энергетики на данных территориях в непростое время. Среди ‘старых’ российских территорий лидирует по выбросам SO_2 Рефтинский, от 2.5 до 4 раз меньше выбросы SO_2 в Норильске. Выбросы в Карабаше и Челябинске в 4 меньше, чем в Норильске. Для Карабаша и Норильска отмечаем положительный тренд в объеме антропогенных выбросов SO_2 . Для остальных территорий есть незначительный отрицательный тренд. Для сезонных вариаций характерно снижение выбросов в летний сезон.



На рисунке 4 показаны графики содержания SO_2 в столбе атмосферы, основанные на OMI, при усреднении значений за март-сентябрь. Спутниковая оценка показала превосходящее в разы содержание SO_2 в столбе атмосферы для Норильска относительно других территорий, составляющее 4.8 - 7 раз в 2005 году с уменьшением к 2024 году до 1.7- 3.5 раза. Отметим отрицательный тренд в содержании SO_2 в столбе атмосферы для Норильска, Челябинска и Донецка, для остальных территорий –слабый положительный тренд.

Сезонные вариации содержания SO_2 в столбе атмосферы по данным OMI показаны на графиках рисунка 5. Прослеживается снижение содержания SO_2 в атмосфере в летний сезон для всех территорий.

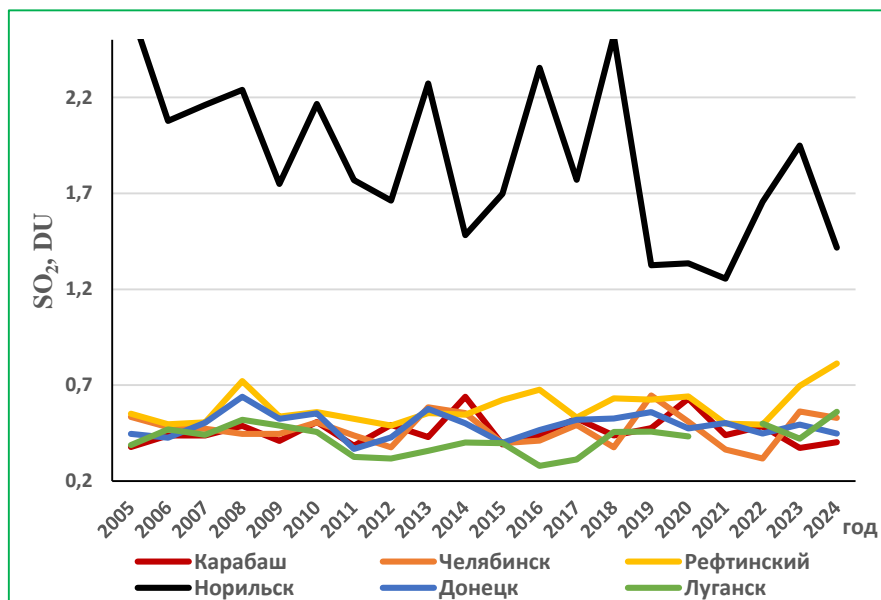


Рис. 4. Межгодовые вариации содержания SO_2 в столбе атмосферы

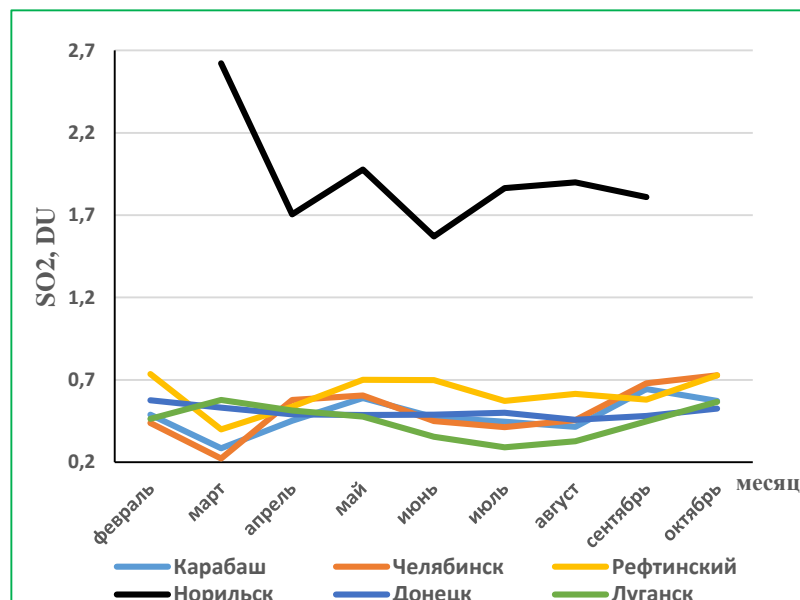


Рис.5. Сезонные вариации содержания SO_2 в столбе атмосферы по данным OMI



ВЫВОДЫ



Для нескольких городов России сделана оценка содержания диоксида серы в столбе тропосферы по измерениям прибора ОМІ спутника Aura с $PR=0.25^\circ \times 0.25^\circ$ для периода 2005-2024 гг. и оценка антропогенных выбросов SO_2 на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT v5.3 онлайн сервиса ECCAD доступный для сетки с $PR 0.1^\circ \times 0.1^\circ$ для периода 2000-2023 гг. на примере нескольких городов России Выбор территорий (Норильск, Рефтинский, Карабаш, Челябинск, Донецк, Луганск). обусловлен повышенными антропогенными выбросами $НСНО$ по данным кадастра CAMS-GLOB-ANT и спутниковыми данными.

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 содержания SO_2 в столбе атмосферы для Норильска относительно других территорий, составляющее в 2005 году 4.8 - 7 раз с уменьшением к 2024 году до 1.7- 3.5 раза. По данным кадастра годовые выбросы SO_2 в Рефтинском превышают выбросы в Норильске от 2 до 4 раз.

2) По кадастру антропогенные годовые выбросы SO_2 в Донецке и Луганске существенно снизились с 90 кт/год в 2012 году до 13 кт/год в 2023 году, 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) Сезонные вариации выбросов диоксида серы по кадастру согласуются со спутниковыми данными содержания SO_2 в столбе атмосферы, а именно, объем выбросов и содержание SO_2 в атмосфере снижается в летний сезон.

A vibrant blue sky with wispy white clouds. A bright sunburst or light flare is visible at the bottom center, partially obscured by a horizontal band of clouds. In the bottom right corner, a small portion of a dark, silhouetted landscape is visible.

СПАСИБО!



ЛИТЕРАТУРА

- Дрюкова Е.Д., Неробелов Г.М., Седеева М.С., Киселев А.В., Махура А.Г., Горный В.И.. Анализ природы повышенных содержаний диоксида серы в приземном воздухе северной части Финляндии при помощи спутникового мониторинга и математического моделирования//Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. 59. № 4. С. 450–460. DOI: 10.31857/S0002351523040041.
- 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. 26. № 9. С. 793-797.
- Зуев Д.В. Спутниковый мониторинг выбросов диоксида серы техногенных объектов северных территорий Красноярского края// Дисс. соиск. уч. степ. к.т.н. Красноярск. 2018. file:///C:/Users/rnv/Desktop/SO2/new_Зуев_Кротков/Диссертация_Zuev_2018.pdf
- Bauduin S., Clarisse L., Clerbaux C., Hurtmans D., and Coheur P.-F. IASI observations of sulfur dioxide (SO₂) in the boundary layer of Norilsk// J. Geophys. Res. Atmos. 2014. 119. P. 4253–4263, doi:10.1002/2013JD021405.
- Beirle S., Hörmann C., Penning de Vries M., Dörner S., Kern C., Wagner T. Estimating the volcanic emission rate and atmospheric lifetime of SO₂ from space: a case study for Kīlauea volcano, Hawai`I // Atmos. Chem. Phys. 2014. 14. P. 8309–8322. <https://doi.org/2014.10.5194/acp-14-8309-2014>
- Bessagnet C.B., Bond T., D'Angiola A., van der Gon H.D., Granier C., Frost G.J., Heil A., Kaiser J.W., Kinne S., Klimont Z., Kloster S., Lamarque J.-F., Lioussse C., Masui T., Meleux F., Mieville A., Ohara T., Raut J.-C., Riahi K., Schultz M. G., Smith S. J., Thompson A., van Aardenne J., van der Werf G. R., van Vuure D. P. Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period// Climatic Change. 2011. 109. P. 163-190. DOI: 10.1007/s10584-011-0154-1.
- Fioletov V.E., McLinden C.A., Krotkov N., and Li C.. Lifetimes and emissions of SO₂ from point sources estimated from OMI//Geophys. Res. Lett. 2015. 42. P.1-8. doi: 10.1002/2015GL063148.
- Fioletov V.E., McLinden Chris A., Krotkov N., Li C., Joiner J., Theys N., Carn S., and Moran Mike D. A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument// Atmos. Chem. Phys. Discuss., doi:10.5194/acp-2016-417, 2016.
- Fioletov V.E., McLinden C.A., Griffin D., Abboud I., Krotkov N., Leonard P.J.T., Li C., Joiner J., Theys N., and Carn S.. Version 2 of the global catalogue of large anthropogenic and volcanic SO₂ sources and emissions derived from satellite measurements// Earth Syst. Sci. Data. 2023. 15. P. 75–93. <https://doi.org/10.5194/essd-15-75-2023>.
- Lee C., Martin R.V., van Donkelaar A., Lee H., Dickerson R.R., Hains J.C., Krotkov N., Richter A., Vinnikov K., Schwab J.J. SO₂ emissions and lifetimes: Estimates from inverse modeling using in situ and global, spacebased (SCIAMACHY and OMI) observations // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D06304. <https://doi.org/10.1029/2010JD014758>.
- Levelt P., Oord G.H.J., Dobber M., Malkki A., Visser H., Vries J., Stammes P., Lundell J.O.V., Saari H. The ozone monitoring instrument// IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens. 2006. 44. P. 1093-1101. DOI: 10.1109/TGRS.2006.872333.