Базы данных и сервисы спутниковых измерений газового и аэрозольного состава атмосферы

А.А. Тронин, М.П. Васильев, Г.М. Неробелов, В.С. Урманов, А.В. Киселев

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН Санкт-Петербург, 199178, Россия E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

Обзор посвящён доступным данным спутниковых измерений основных загрязняющих воздух газовых и аэрозольных примесей и средствам, с помощью которых данные распространяются. В статье рассматриваются основные публично доступные наборы данных спутниковых измерений, которые доводятся до конечного пользователя либо посредством размещения данных на веб-странице группы исследователей (например, сайт лаборатории), либо через специально разработанный веб-сервис. Согласно исследованию, веб-сервис NASA GES DISC (англ. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) является наиболее эффективным с точки зрения анализа качества воздуха. Это обеспечено бесплатным распространением информации о содержании загрязнителей на основе измерений, сделанных двумя действующими высококачественными измерительными приборами — OMI (англ. Ozone Monitoring Instrument) и TROPOMI (англ. Tropospheric Monitoring Instrument) (и не только ими); предоставлением данных с высоким временным и пространственным разрешением и с различным уровнем обработки (от L1 (англ. Level 1) до L4 (англ. Level 4)); регулярным обновлением данных на сервисе; удобством и быстротой получения спутниковых данных благодаря встроенному веб-сервису. Однако при проведении исследований на основе данных спутниковых измерений важно не ограничиваться одним источником информации, а рассматривать все доступные наборы данных. Это связано, например, с использованием отдельными учёными разных алгоритмов восстановления содержания загрязнителей в атмосфере, с разной измерительной погрешностью спутниковых приборов, с их пространственным разрешением и т.д.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, спутниковые измерения, веб-сервисы

Одобрена к печати: 18.09.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-97-116

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения загрязнение воздуха газовыми примесями (NO₂, SO₂, O₃, CO, HCHO и др.) и аэрозолями является одной из самых серьёзных экологических угроз для здоровья человека. Так, ряд загрязнителей, попадающих в воздух городской среды, обладают наивысшим или высоким классом опасности для человека (например, O₃ и HCHO согласно (СанПиН..., 2021)). Основной вред организму газовые и аэрозольные загрязнители наносят, попадая в него в основном через дыхательные пути, достигая внутренних органов и нарушая их работу. В особой группе риска находятся люди с респираторными заболеваниями, пожилое население и дети. Согласно информации (Air..., 2022), ~90 % населения Земли проживает в условиях повышенного загрязнения воздуха. Основной вклад в ухудшение качества воздуха на территориях, где проживает человек, вносит антропогенная активность, а главным образом сжигание ископаемого топлива (Wallace, Hobbs, 2006). Очевидно, что в зависимости от антропогенной активности, а также преобладающих метеорологических условий, уровень качества воздуха должен различаться между странами, регионами, городами.

Согласно данным (United..., 2021), в США за период с 1990 по 2020 г. в результате сокращения антропогенных выбросов, содержание СО уменьшилось на 73 %, SO_2 — на 91 %, NO_2 — на 61 %. Несмотря на это, в 2020 г. ~29 % населения США проживало в условиях с уровнем качества воздуха ниже принятых национальных стандартов. Исследование (Huang et al., 2024), основанное на измерениях приземной концентрации основных загрязнителей

воздуха (NO₂, CO, SO₂) на ~4000 станций, указывает на общее уменьшение концентрации загрязнителей (на ~20-60 %) в Китае за период с 2014 по 2022 г.

В табл. 1 приводятся тенденции изменения среднегодовой приземной концентрации основных загрязняющих примесей в городах Российской Федерации за 2018–2022 гг. (О состоянии..., 2023). По состоянию на 2022 г. в 41 городе России наблюдалась высокая химическая нагрузка на население.

Загрязняющие вещества	Количество городов	Тенденция изменения средней за год концентрации, %
Взвешенные вещества	215	-19
Диоксид азота	236	-8
Оксид азота	158	-9
Диоксид серы	231	0
Оксид углерода	220	-18
Бенз(а)пирен	167	-24
Формальдегид	160	+4

Таблица 1. Тенденция изменения средней за год концентрации загрязняющих веществ в городах Российской Федерации за 2018–2022 гг.

Кроме того, по данным (Ежегодник..., 2022), в 2021 г. ~46 % городского населения России находилось под воздействием высокого и очень высокого уровня загрязнения воздуха. Различия в качестве воздуха между регионами Российской Федерации связаны как с разностью эмиссий антропогенных загрязнителей и их прекурсоров между субъектами страны, так и с метеорологическими особенностями места наблюдений. Согласно данным (Доклад..., 2022), в Москве за 2021 г. среднегодовая концентрация ряда загрязнителей воздуха (NO₂, O₃, HCHO) превысила среднегодовую предельно допустимую концентрацию. При этом за период с 2011 по 2021 г. выраженная тенденция на уменьшение содержания основных загрязнителей у поверхности Земли в Москве не проявлялась.

Современная система мониторинга качества воздуха включает в себя широкий диапазон измерительных методов и приборов, различающихся количеством измеряемых примесей, погрешностью измерений, пространственным и временным разрешением (горизонтальным и вертикальным) и др. Из всех методов можно выделить те, которые реализуются при помощи искусственных спутников Земли, т.е. из космоса. Преимущество спутниковых методов для задач мониторинга качества воздуха заключается: 1) в глобальном покрытии измерений за относительно небольшой временной промежуток (до одного дня); 2) высоком пространственном разрешении (до менее 2 км); 3) высокой информативности спутниковых измерений (информация о содержании десятков примесей в атмосфере).

Согласно обзору спутниковых методов измерений качества воздуха (Martin, 2008), целенаправленные измерения состава тропосферы были начаты с 1978 г. после вывода на земную орбиту прибора TOMS (*англ.* Total Ozone Mapping Spectrometer) на борту спутника Nimbus-7. С того времени по сегодняшний день было разработано и выведено на земные орбиты множество спутниковых приборов. Из них можно выделить GOME (*англ.* Global Ozone Monitoring Experiment) на борту ERS-2 (*англ.* European Remote-Sensing Satellite) с 1995 по 2011 г., GOME-2 на борту спутников серии MetOp с 2007 г., SCIAMACHY (*англ.* Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) на борту Envisat с 2004 по 2012 г., OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) на борту спутника Aura с 2004 г., AIRS (*англ.* Atmospheric Infra-Red Sounder) на борту Aqua с 2002 г., TROPOMI (*англ.* Tropospheric Monitoring Instrument) на борту Sentinel-5P с 2018 г., IASI (*англ.* Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) на борту спутников серии MetOp с 2007 г. и др. Результаты измерений данных спутниковых систем активно используются для анализа качества воздуха в крупных городах и выявления закономерностей, приводящих к его ухудшению (Морозова и др., 2022; Тронин и др., 2019, 2023; Dang et al., 2023; Fu et al., 2018; Martin et al., 2004; Sedeeva et al., 2021). Большое количество исследований по данному направлению указывает на понимание актуальности проблемы загрязнения воздуха и мониторинга его качества при помощи спутниковых приборов среди учёных со всего мира. Большую роль в проведении подобных исследований играет доступность данных спутниковых измерений состава атмосферы, которая в первую очередь может быть обеспечена бесплатным доступом к данным. Во-вторых, налаженным регулярным сбором данных спутниковых измерений, восстановлением содержания газов и аэрозолей в атмосфере, структурированным хранением и распространением данных посредством веб-сервисов. Сегодня существует множество баз данных спутниковых измерений состава атмосферы, которые распространяются на бесплатной основе с помощью веб-сервисов. При проведении соответствующих исследований полезно знать основные различия подобных баз данных и веб-сервисов и их преимущества друг перед другом. Поэтому в текущей работе приведён обзор таких сервисов и баз данных, выделены их достоинства и недостатки.

Описание сервисов и баз данных

Данные Университета Бремена

На сайте https://www.iup.uni-bremen.de/doas/ Университета Бремена, Германия (*нем.* Universität Bremen), доступны данные о содержании NO₂, SO₂ и HCHO в атмосфере Земли, полученные на основе спутниковых измерений приборами GOME, GOME-2 и SCIAMACHY.

Спутниковый прибор GOME (Beirle et al., 2004; Burrows et al., 1999) — это спектрометр, направленный в надир и измеряющий отражённое и рассеянное солнечное излучение в ультрафиолетовом (УФ, *англ*. UltraViolet — UV) и видимом (*англ*. VISible — VIS) диапазоне электромагнитных (ЭМ) длин волн (240–790 нм). Диапазон разделён на четыре канала шириной по ~200 нм, спектральное разрешение в каналах составляет от 0,2 до 0,4 нм (https:// space.oscar.wmo.int/instruments/view/gome). На основе измеренных спектров учёные восстанавливают содержание ряда газов (NO₂, HCHO, O₃, SO₂ и др.) и аэрозолей во всей атмосфере, а также в её выделенных частях. Пространственное разрешение измерений составляет 40×40 км для полосы обзора 120 км и 40×320 км для полосы обзора 960 км. Глобальное покрытие данными достигается за 24 дня при высоком пространственном разрешении и за 3 дня при низком разрешении. Прибор был размещён на борту спутника ERS-2, проводившего измерения с 1995 по 2011 г.

Прибор GOME-2 (Callies et al., 2000; Munro et al., 2016) был запущен в 2007 г. на бортах трёх спутников серии MetOp и схож по характеристикам с GOME. Спектральный диапазон такой же, как у GOME, с разрешением 0,24-0,53 нм. Пространственное разрешение составляет 40×40 и 40×80 км.

Прибор SCIAMACHY (Bovensmann et al., 1999) работал в период с 2002 по 2012 г. на борту спутника Envisat. Это спектрометр, измеряющий в надир отражённое и рассеянное солнечное излучение в УФ, видимом, ближнем инфракрасном (БИК) и коротковолновом инфракрасном (КВИК) спектрах (214–2386 нм) со спектральным разрешением от 0,24 до 1,48 нм. Пространственное разрешение составляет 30×60 км, глобальное покрытие достигалось за три дня. На основе измеренного излучения возможно восстановить атмосферное содержание таких примесей, как NO_x (NO+NO₂), SO₂, O₃, HCHO, аэрозолей и др.

Несмотря на указанный период и пространственный охват, данные из источника (https:// www.iup.uni-bremen.de/doas/) получены в ходе работы ряда европейских проектов и поэтому покрывают разные временные интервалы, атмосферные слои, обладают разным пространственным разрешением и т.д. Например, информация о тропосферном NO₂ доступна за 1996–2003 гг. в виде глобальных среднемесячных данных в формате ASCII (*анел*. American Standard Code for Information Interchange) с разрешением 0,5° на основе измерений GOME. Сведения об HCHO на основе наблюдений GOME можно получить в похожем виде, но только за 1997 г. Данные SO₂ существуют в виде построенных изображений для отдельных участков планеты и пригодны лишь для визуального анализа. Информация о содержании NO_2 в тропосфере в виде среднемесячных значений за более актуальный период (2007–2012) доступна из того же источника на основе спутниковых измерений GOME-2 в формате HDF (*анел*. Hierarchical Data Format).

Данные о содержании SO₂, NO₂, HCHO и других примесей на основе спутниковых измерений SCIAMACHY доступны за разные временные интервалы, так как были получены в ходе ряда научных проектов. Информация об общем содержании SO₂ доступна только в виде уже отрисованных изображений за 2002-2012 гг. для всей поверхности Земли, кроме полярных областей с частотой один день. Данные NO₂ есть в виде как общего содержания, так и готовых изображений в тропосфере за тот же период и с той же частотой, что и SO₂. Кроме того, сведения о содержании NO₂ в тропосфере на основе измерений SCIAMACHY доступны в форматах HDF и ASCII с пространственным разрешением 0,125° в виде среднемесячных значений за период с 2002 по 2011 г. Информация о содержании HCHO в тропосфере доступна за период с 2002 по 2008 г. в виде среднемесячных данных.



Рис. 1. Примеры пространственного распределения содержания SO₂ (*a*, *b*, *d*) и NO₂ (*б*, *c*, *e*) на основе спутниковых измерений GOME (*a*, *b*), GOME-2 (*b*, *c*) и SCIAMACHY (*d*, *e*) за произвольные даты

Описанные выше данные NO_2 приборов GOME, GOME-2 и SCIAMACHY получены при помощи методики, которая учитывает разное разрешение измерительной аппаратуры и приводит данные к виду, в котором их можно рассматривать совместно (Hilboll et al., 2013). Данные на основе трёх спутниковых приборов использовались в ряде научно-исследовательских задач за последние два десятилетия как совместно, так и раздельно. За этот период показана применимость спутниковых данных для оценки тренда содержания NO_2 на выделенных территориях конкретных стран (He et al., 2007), эмиссий ряда загрязнителей естественного и антропогенного происхождения (Lee et al., 2011), для совершенствования алгоритмов восстановления содержания примесей в атмосфере на основе спутниковых измерений (Richter et al., 2011) и т.д.

На *рис. 1* (см. с. 100) приведены примеры уже построенного пространственного распределения спутниковых данных, доступных на сайте Университета Бремена. Описанный набор данных в представленном на сайте виде подойдёт для анализа отдельных случаев загрязнения воздуха. В свою очередь, анализ долговременного изменения содержания загрязнителей в конкретном районе будет затруднён небольшим временным покрытием данных (7–10 лет), грубым временным разрешением (среднемесячные) и доступностью некоторых из наборов данных исключительно в виде уже отрисованных изображений. Однако на сайте Университета Бремена представлена не вся доступная информация. Определённая часть данных может быть получена при личном обращении к учёным, которые занимались их подготовкой.

Данные сервиса GES DISC

OMI

Инструмент OMI — это спектрометр, расположенный на спутнике Aura, который функционирует с конца 2004 г. (Levelt et al., 2006). Прибор измеряет в надир отражённое от поверхности Земли и рассеянное ЭМ-излучение в коротковолновой области (270–500 нм, UV/VIS) со спектральным разрешением ~0,5 нм. Пространственное разрешение составляет 13×24 км с возможностью увеличения до 13×12 км (Ozone..., 2017). Широкое поле зрения прибора (2600 км) позволяет получать глобальное покрытие измерениями ежедневно. Ограничением измерений становятся облачность, поверхность Земли с высоким альбедо (лёд, снег) и отсутствие солнечного излучения (например, полярная ночь).

Из данных об отражённом и рассеянном солнечном излучении на основе спутниковых измерений прибором OMI восстанавливают содержание ряда загрязняющих примесей при помощи решения обратной задачи атмосферной оптики. Из примесей можно выделить наиболее значимые для состояния качества воздуха — NO₂, SO₂, CO, HCHO, аэрозоли. Из-за различий во взаимодействии молекул газов и аэрозолей с ЭМ-излучением различаются и математические алгоритмы по восстановлению содержания данных примесей в атмосфере.

Большая часть данных о содержании примесей в атмосфере на основе измерений OMI хранится на сайтах сервиса NASA GES DISC, где она представлена в виде данных уровня обработки L2 (*англ*. Level 2) и L3 (*англ*. Level 3). Один файл данных L2 содержит отдельную сцену измерений, которая покрывает определённый период спутниковых измерений в течение дня с оригинальным пространственным разрешением. В свою очередь, данные L3 приведены к регулярной пространственной сетке (0,25 или 1°), один файл содержит данные, покрывающие всю поверхность Земли за день или в среднем за месяц. На *рис. 2* (см. с. 102) приводится пример содержания NO₂ в тропосфере за 4 октября 2004 г. на основе данных OMI версии L2 (MEaSUREs версии 1.1) и L3 (OMNO2d версии 003). Из изображения с приближением к территории Индии (см. *рис. 26*) можно заметить, что оба набора данных демонстрируют достаточно близкое пространственное распределение содержания NO₂ в тропосфере. Однако данные L2 отражают локальные максимумы в содержании, которые сглаживаются в данных L3 (например, на юге Индии). Можно предположить, что для многих научно-исследовательских задач (анализ загрязнения воздуха на выделенной территории, идентификация

случаев трансграничного переноса, оценка глобального многолетнего тренда содержаний загрязнителей и др.) набор данных L3 будет более удобным, так как занимает меньше места и охватывает всю земную поверхность. Однако, к примеру, в задачах оценки эмиссий NO_x (NO_2+NO) из антропогенных источников корректно использовать данные более высокого разрешения L2.



Рис. 2. Содержание NO₂ в тропосфере 4 октября 2004 г. по данным измерений OMI L2 (*слева*) и L3 (*справа*) на глобальном масштабе (*a*) и с приближением к территории Индии (б)

На *рис. 3* (см. с. 103) приводятся примеры пространственного распределения среднего общего содержания SO_2 и тропосферного NO_2 на территории России и окрестностей на основе спутниковых измерений OMI L3 за 2004–2023 гг. Из изображений можно выделить области повышенного содержания газов, которые распределены по территории России неравномерно. Отметим преимущественно разное положение областей повышенного содержания SO_2 и NO_2 . Это говорит о различиях в источниках этих газов. Один из таких примеров — территория г. Норильска, в районе которой наблюдаются наибольшие средние значения общего содержания SO_2 (см. *рис. 3a*). При этом среднее значение эмиссий NO_2 в этом районе (см. *рис. 36*) низкое. Напротив, одна из областей повышенного содержания NO_2 наблюдается в районе Москвы, где содержание SO_2 на фоне других источников невелико. Однако это означает лишь то, что на территории России находятся более крупные источники SO_2 . Уменьшение максимального порога на цветовой шкале позволяет наблюдать, что повышенное содержание SO_2 также соответствует положению крупных населённых зон (см., например, *рис. 4*, см. с. 103).

Многие учёные используют данные о содержании газов и аэрозолей в атмосфере на основе спутниковых измерений ОМІ. Часто целью применения выступают задачи оценки загрязнения атмосферного воздуха, анализ многолетнего изменения содержания примесей в атмосфере и т.д.



Рис. 3. Пространственное распределение среднего общего содержания SO₂ (*a*) и тропосферного NO₂ (*b*), а также их стандартные отклонения (б и *г* соответственно) на территории России и окрестностей на основе спутниковых измерений OMI за 2004–2023 гг.



Рис. 4. Пространственное распределение среднего общего содержания SO₂ с приближением к территориям Ленинградской (1) и Московской (2) областей на основе спутниковых измерений ОМІ за 2004–2023 гг.

В исследовании (Barkley et al., 2017) показано, что наибольшее содержание HCHO, ОСНСНО и SO₂ на территории некоторых стран Среднего Востока наблюдается над территориями нефтеперерабатывающих заводов и морских портов, из которых перевозят ископаемое топливо. При этом наибольшее содержание NO₂ отмечается над территориями городов и портов. Преимущественно обнаружено ухудшение качества воздуха на территории исследования за период с 2004 по 2015 г. В свою очередь, на основе данных спутниковых измерений ОМІ выявлено уменьшение содержания NO₂ на территории крупных городов США на ~20–40 % за 2004–2013 гг. (Lamsal et al., 2015).

TROPOMI

Прибор TROPOMI представляет собой спектрометр, установленный на борту спутника Sentinel-5P, измеряющий в надир. Прибор принимает отражённое и рассеянное солнечное излучение в диапазоне длин волн от УФ до БИК. Ширина полосы обзора TROPOMI ~2600 км. Типичный размер пикселя (вблизи надира) составляет 7×3,5 км почти для всех спектральных диапазонов. TROPOMI был запущен на спутнике 13 октября 2017 г. До апреля 2018 г. проводилась серия калибровок и испытаний прибора. Первые наборы данных были получены в середине июля 2018 г. На основе измеренных спектров ЭМ-излучения научные группы восстанавливают содержание озона, метана, формальдегида, аэрозоля, окиси углерода, диоксидов азота, серы и других компонент в атмосфере. Данные измерений покрывают всю поверхность Земли с шагом в один день.

Основной объём информации о содержании примесей в атмосфере на основе измерений TROPOMI содержится на сайтах сервиса GES DISC (там же, где доступны данные OMI) в виде данных L2 и L3. Кроме того, часть данных может быть получена в цифровых источниках европейской программы Copernicus (например, в виде визуализированных полей тропосферного содержания NO_2 , см. https://maps.s5p-pal.com/no2-tropospheric/). Данные L2 доступны преимущественно с оригинальным шагом спутниковых измерений и в виде общего содержания газов в тропосфере и всём атмосферном столбе, а также в виде вертикальных профилей. Данные L3 представлены на регулярной широтно-долготной сетке с шагом 1 км в виде общего содержания и доступны только для NO_2 в виде средних за 1 и 3 мес, а также за год.

Информация о содержании газов и аэрозолей в атмосфере на основе спутниковых измерений TROPOMI широко используется для анализа степени загрязнения атмосферного воздуха и определения источников этого загрязнения. Так, например, в августе 2018 г. на западе США и в Канаде случились обширные пожары. С помощью данных спутниковых измерений TROPOMI было обнаружено высокое содержание монооксида углерода (СО) и высокий положительный UV-аэрозольный индекс, что может указывать на поглощение аэрозолей чёрного углерода, вызванное сжиганием биомассы. Исследование показало, что параметр UVAI (*анел*. UV Aerosol Index, УФ-индекс аэрозоля) на основе спутниковых измерений TROPOMI может быть использован для обнаружения аэрозолей при наличии облаков. Выбросы от огромного сжигания биомассы распространились по южной Канаде и северу США (Zeng et al., 2018).

Прогнозы качества воздуха на глобальном, региональном и локальном масштабах исключительно важны для целей здравоохранения. Исследования, проведённые Службой мониторинга атмосферы Copernicus, показывают, что использование данных TROPOMI значительно улучшает прогноз состава атмосферы, который производится с применением Европейской интегрированной системы прогнозирования (*англ.* Integrated Forecast System — IFS) (Inness et al., 2019). На *рис. 5* (см. с. 105) представлены примеры таких информационных продуктов TROPOMI. На нём видны повышенные значения СО и НСНО над Австралией 2 декабря 2018 г. в районах, сильно пострадавших от лесных пожаров (см. *рис. 5a, б*; положения лесных пожаров на *рис. 5в*). Карта значений NO₂ над Европой от 27 июня 2018 г. демонстрирует, что разрешение TROPOMI достаточно, чтобы обнаружить шлейфы загрязнения, исходящие из отдельных городов (Лондона, Парижа, Гамбурга). Карта также показывает высокий уровень NO₂ в Нидерландах, Рурском регионе в Германии и долине реки По на севере Италии, а также повышенные значения NO₂ в результате пожаров в Сэдлворт-Мур на северо-востоке Англии (см. *рис. 5г*). На *рис. 5д* показано пониженное общее содержание O₃ в столбе в районе озоновой дыры Южного полушария 1 октября 2018 г. На *рис. 5е* видны области повышенного SO₂ над восточным Средиземноморьем в результате извержения влк. Этна на Сицилии 26 декабря 2018 г.



Рис. 5. Примеры спутниковых данных TROPOMI для ряда химических веществ: *a* — общее содержание CO в атмосфере; *б* — общее содержание HCHO над Австралией 2 декабря 2018 г.; *в* — местонахождение пожаров от Глобальной системы противопожарной защиты GFAS (*англ.* Global Fire Assimilation System) в тот же день; *г* — тропосферное содержание NO₂ над Европой 27 июня 2018 г.; *д* — общее содержание O₃, показывающее антарктическую озоновую дыру 1 октября 2018 г.; *е* — общее содержание SO₂ 26 декабря 2018 г. в результате извержения влк. Этна на о. Сицилия (Inness et al., 2019)

В работе (Patel, 2020) данные TROPOMI были использованы для анализа влияния локдауна, связанного с COVID19, на изменение уровня содержания NO_2 в тропосфере. Поскольку в Великобритании часто наблюдается значительная облачность и в отдельные дни могли быть большие пробелы в данных, анализ в основном основан на картах, усреднённых за определённый период, или временных рядах, усреднённых по региону. На *рис. 6* (см. с. 106) показаны двухнедельные карты NO_2 , полученные на основе данных TROPOMI по Великобритании в период с середины марта (начало карантина) до середины апреля 2020 г. Для сравнения представлен тот же интервал для 2019 г. Спутниковые данные NO_2 показывают существенно более низкое содержание в 2020 г. по сравнению с 2019 г., особенно в крупных городских центрах. Также наблюдается снижение значений по мере того, как период изоляции 2020 г. продлевался до апреля 2020 г., что особенно заметно в Лондоне. Подобная ситуация наблюдается и по данным измерений других спутниковых приборов.



Рис. 6. Пространственное распределение среднего двухнедельного значения содержания NO₂ в тропосфере (единицы – 10¹⁵ молекул/см²) на основе спутниковых измерений TROPOMI с середины марта до середины апреля 2019 г. (*вверху*) и 2020 г. (*внизу*)

Дополнительно отметим, что на сайте сервиса GES DISC предусмотрено использование специального веб-инструмента, который позволяет отобрать необходимый массив данных для скачивания. С помощью этого инструмента можно получить данные на выделенном участке планеты за конкретный временной промежуток и отобрать нужные переменные, которые будут содержаться в финальной выборке. Благодаря этому инструменту размер интересующего массива данных может быть существенно уменьшен (в несколько раз).

Данные сервиса Copernicus

Европейская служба Copernicus также занимается сбором, обработкой и распространением данных о содержании ряда примесей в атмосфере на основе измерений европейскими спутниками. На сайте https://browser.dataspace.copernicus.eu представлен сервис, проецирующий данные измерений спутниками серии Sentinel на карту Земли. Кроме того, сервис позволяет отобрать нужный массив данных для скачивания. Однако, в отличие от GES DISC, выбрать данные можно только по времени и по пространству. Из всех спутников серии Sentinel, пятая модель — Sentinel-5P или S5P — имеет на борту уже описанный выше прибор TROPOMI, позволяющий получить информацию о содержании ряда основных загрязнителей воздуха. Данные TROPOMI на сайте службы Copernicus представлены в обработке L2 с оригинальным шагом по пространству за каждый день измерений в оперативном режиме. На *рис.* 7 (см. с. 107) приводится пространственное распределение общего содержания NO₂ только

над поверхностью Земли за 16.04.2024 (день обращения 16.04.2024) в районе Евразии по данным измерений TROPOMI. На изображении также виден интерфейс сервиса https://browser. dataspace.copernicus.eu. Отметим, что практически такой же сервис доступен на сайте https:// apps.sentinel-hub.com/eo-browser, на котором, однако, нет возможности скачивать массивы данных.



Рис. 7. Пространственное распределение общего содержания NO₂ над поверхностью Земли за 16.04.2024 г. в районе Евразии по данным измерений TROPOMI

Данные сервиса TEMIS

Сервис TEMIS (*анел.* Tropospheric Emission Monitoring Internet Service), представленный на сайте https://www.temis.nl/index.php, даёт доступ к наборам данных загрязняющих примесей (NO₂, CO, HCHO) на основе спутникового зондирования. Сайт TEMIS обслуживается учёными из Королевского метеорологического института Нидерландов (*нидерл.* Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut — KNMI, https://www.knmi.nl/home). Данные сервиса получены на основе спектроскопических измерений четырёх спутниковых приборов — GOME, GOME-2, SCIAMACHY и OMI. Для восстановления содержания примесей в атмосфере используется несколько математических алгоритмов, описание которых представлено на сайте TEMIS. Большинство данных размещено в виде глобального распределения в отдельные дни и в виде среднемесячных значений. Данные покрывают временной интервал с 1996 г. (GOME) по настоящее время (GOME-2, OMI).

Особый интерес представляют наборы данных, охватывающие наиболее широкий временной диапазон. Одним из таких — набор данных тропосферного NO_2 на основе измерений GOME/SCIAMACHY/GOME-2, покрывающий временной интервал с 1996 по 2017 г. База данных получена при помощи алгоритма TM4NO₂A v2.3 и доступна на вебсайте TEMIS. Отличия алгоритма TM4NO₂A версии 2.3 от версии 1.0 можно найти в работе (Boersma et al., 2011). Ниже кратко опишем основные особенности базы данных GOME/SCIAMACHY/ GOME2.

Информационная система GOME/SCIAMACHY/GOME2 представляет собой обработанные по специальной методике данные о содержании NO₂ приборов: GOME (с апреля 1996 г. по июнь 2003 г.), SCIAMACHY (с июля 2002 г. по март 2012 г.), GOME-2A (с января 2007 г. по сентябрь 2017 г.) и GOME-2B (с января 2013 г. по сентябрь 2017 г.). Данные GOME-2 (MetOp-B) обновлялись за 2024 г. На сайте TEMIS сведения о суммарном содержании диоксида азота в тропосфере за отдельные сутки размещаются в формате HDF и в виде изображений. Данные представлены в виде среднемесячных на глобальном масштабе с регулярным пространственным разрешением.

База данных получена следующим образом. Схема восстановления данных проходила в три этапа. На первом этапе содержание диоксида азота в атмосферном столбе, соответствующем направлению движения отражённого солнечного излучения (NO₂ SCD, англ. slant column density), восстанавливалось с помощью метода DOAS (англ. Differential Optical Absorption Spectroscopy) (Platt, 1994). Для восстановления SCD NO₂ использовался диапазон длин волн ЭМ-излучения 425–450 нм. Подробнее о выделение вклада диоксида азота от других факторов на этапе метода DOAS можно прочесть в статье (Vandaele et al., 2005). На втором этапе с помощью трёхмерного численного моделирования содержания NO2 во всей атмосфере и с помощью модели TM4 (Dentener, Crutzen, 1994) и ассимиляции измерений рассчитывалась доля тропосферного и стратосферного NO2 в SCD. Метод описан в статье (Dirksen et al., 2011). На третьем этапе из SCD рассчитывалась VCD (англ. vertical column density) для тропосферы с помощью оценки множителя воздушной массы или AMF (англ. air mass factor). Для этого использовалась модель DAK (англ. Doubling-Adding KNMI radiative transfer model) (Stammes, 2001). Метод описан в статье (Boersma et al., 2004). При восстановлении использовалась база климатологических данных об альбедо поверхности Земли, а также данные об облачности и высоте вершин облаков, которые восстанавливались с помощью алгоритма FRESCO (*ahea*. Fast Retrieval Scheme for Cloud from the Oxygen) (Koelemeijer et al., 2001).

Данные GOME, SCIAMACHY, GOME-2 объединены в базу с неформальным названием GOME/SCIAMACHY/GOME2 и приведены к пространственному разрешению $0,25 \times 0,25^{\circ}$. При осреднении отфильтровывались значения для областей, где доля облачности была более 50 %, альбедо более 0,3, солнечный зенитный угол более 80° . Исследователями получены пространственные и временные закономерности изменения концентрации диоксида азота как в глобальном масштабе, так и для отдельных государств и регионов мира (Georgoulias et al., 2019). На *рис.* 8 представлен пример среднемесячного содержания NO₂ в тропосфере за сентябрь 2016 г. по данным GOME/SCIAMACHY/GOME2. Отчётливо выделяются области повышенных значений, которые соответствуют положению крупных городов стран Европы (Лондона, Парижа) и России (Москвы и Санкт-Петербурга).



Рис. 8. Пространственное распределение среднемесячного содержания NO₂ в тропосфере на территории Северо-Западной части России и Европы на основе спутниковых измерений GOME/ SCIAMACHY/GOME-2 за сентябрь 2016 г.

- 8
. 5
LT.
5
r r
5
Ö
5
. 8
<u> </u>
_ <u> </u>
. 0
17
-×
. 0
5
<u> </u>
o l
3
1
\sim
ΓT
ā
[]
CDI
tCDI
etCDI
NetCD1
NetCDI
NetCDI
: NetCDI
e: NetCDI
1 e: NetCDI
и е: NetCDI
ние: NetCDI
ние: NetCDI
ание: NetCDI
ание: NetCDI
чание: NetCDI
чание: NetCDI
ечание: NetCDI
tечание: NetCDI
мечание: NetCDI
имечание: NetCDI
имечание: NetCDI
имечание: NetCDI
римечание: NetCDI
Iримечание: NetCDI
Примечание: NetCDI

В *табл. 2* приводятся основные характеристики всех вышеописанных баз спутниковых данных. Из неё можно сделать вывод, что больше всего информации из всех описанных источников данных доступно в сервисе NASA GES DISC. Кроме наибольшего количества примесей, данные на GES DISC доступны с наибольшей временной частотой и пространственным разрешением, что, однако, также зависит от характеристик измерительного оборудования. Однозначно, что на основе наборов данных сервиса GES DISC возможно решать задачи, которые не могут быть решены на основе данных иных описанных публичных наборов данных. К этим задачам относятся мониторинг загрязнения воздуха на территориях отдельных городов (Ialongo et al., 2020) и оценка антропогенных эмиссий газов с территорий городов и промышленных предприятий (Zhang et al., 2023).

Данные российских сервисов

Отметим, что выше приведены не все источники информации и наборы данных спутниковых измерений содержания загрязняющих примесей в атмосфере Земли, но одни из самых популярных и публично доступных. Во многих странах, в том числе в России, работают службы, занимающиеся получением и обработкой (первичной, вторичной и т.д.) данных спутниковых измерений, которые затем бесплатно в определённой степени распространяются до потребителей. Например, в России частично эту работу выполняют учёные из Исследовательского центра имени М. В. Келдыша и Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета», которые обрабатывают и распространяют данные спутниковых радиометрических измерений прибора ИКФС-2 (инфракрасный фурье-спектрометр) на борту спутников серии «Метеор» (http://planet.rssi.ru/calval/public-ikfs?setlang=ru RU). Прибор ИКФС-2 измеряет в ИК-диапазоне длин волн (665-2000 см⁻¹) со спектральным разрешением 0,5 см⁻¹. На основе данных прибора учёные из Санкт-Петербургского государственного университета восстанавливают глобальное содержание озона во всей атмосфере (Polyakov et al., 2023), а также в тропосфере. В обзоре стоит отметить, что учёными из Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) была разработана система обработки, анализа и хранения разнородных спутниковых наблюдений «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) со встроенным веб-сервисом для удалённого доступа и работы с данными «Вега-Science» (Лупян и др., 2021). Кроме предоставления доступа к данным, сервис «Вега-Science» обладает рядом функций, к которым относятся представление пространственно-временного распределения данных, расчёт статистических характеристик, интегрирование данных по времени и др. В настоящее время в системе «ИКИ-Мониторинг» собираются, хранятся и обрабатываются данные спутниковых измерений состава атмосферы. Так, согласно публикации (Бриль и др., 2023), текущая версия предоставляет доступ к содержанию ряда газовых (NO₂, SO₂, O₃, СО и CH_{λ}) и аэрозольных примесей на основе спутниковых измерений OMI и TROPOMI. Описание «ИКИ-Мониторинг» доступно на сайте http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=8, информацию о доступе к данным спутниковых измерений при помощи «Bera-Science» можно получить на сайте http://sci-vega.ru/. Предполагается, что в будущем данные восстановления содержания атмосферных примесей на основе отечественных спутниковых измерений также будут входить в список продуктов сервиса «ИКИ-Мониторинг».

Заключение

Дан обзор существующих сегодня источников данных спутниковых измерений основных загрязняющих воздух примесей (NO₂, O₃, SO₂, CO, HCHO, аэрозоли) и веб-сервисов, через которые предоставлен доступ к данным. Приведены основные характеристики наборов данных, начиная от диапазона измерений спутниковых приборов и заканчивая форматом выходных данных. Согласно анализу, на текущий момент одним из основных и наиболее попу-

лярных публичных источников данных спутниковых измерений состава нижней атмосферы можно назвать сервис NASA GES DISC. Это связано:

- с предоставлением данных восстановления содержания ряда загрязнителей на основе радиометрических измерений двух высококачественных и апробированных приборов, выполняющих измерения до сих пор — OMI и TROPOMI;
- предоставлением данных о содержании в виде ежедневных значений с оригинальным или близким к нему пространственным разрешением данных, что позволяет исследователям самостоятельно анализировать пространственно-временное распределение загрязнителя с наибольшим доступным разрешением по времени и пространству;
- 3) почти оперативным обновлением данных на сайте сервиса;
- 4) наличием веб-инструмента для отбора только нужной информации из огромного массива данных спутниковых измерений.

Несмотря на все преимущества, перечисленные наборы данных, доступные в сервисе GES DISC, покрывают временной интервал с 2004 г. до текущего времени. В свою очередь, на сайтах Университета Бремена и сервиса TEMIS хранятся данные спутниковых измерений, покрывающие как минимум восемь лет до 2004 г. Поэтому использование этих источников данных может быть полезным для анализа, например, тренда атмосферного содержания загрязняющих примесей в районе городов с 1996 по 2004 г. Также особый интерес для анализа загрязнения воздуха представляет сервис службы Copernicus, так как обеспечивает оперативный доступ к данным и веб-инструмент для построения карт пространственно-временного распределения содержания загрязняющих примесей. Это, например, может ускорить исследовательский процесс и избавить от скачивания большого массива данных для анализа.

Обзор указывает на развитие в области разработки и эксплуатации сервисов по сбору, обработке и хранению данных спутниковых измерений состава атмосферы на базе российских научно-исследовательских институтов. Можно предположить, что сервисы будут развиваться и далее, учитывая активное внимание к составу атмосферы и соответствующую тенденцию к созданию и запуску новых спутниковых измерительных приборов.

Исследование профинансировано грантом Российского научного фонда № 24-27-00156, https://rscf.ru/project/24-27-00156/.

Литература

- 1. *Бриль А.А., Константинова А.М., Лупян Е.А., Бурцев М.А.* Возможности работы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с информацией о малых газовых составляющих, получаемой на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 85–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
- 2. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2021 году». М., 2022. 234 с. https:// www.mos.ru/upload/content/files/d6fb4810f42661667ce2d1b353dbc5ea/2022_all.pdf.
- 3. Ежегодник состояния и загрязнения атмосферы в городах на территории России / Росгидромет. 2022. 254 с. https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/ezhegodniki/.
- 4. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 5. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
- 6. *Морозова А. Э., Сизов О. С., Елагин П. О. и др.* Интегральная оценка качества атмосферного воздуха в крупнейших городах России на основе данных TROPOMI (Sentinel-5P) за 2019–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 23–39. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39.

- О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году: Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М. В. Ломоносова, 2023. 686 с. https://www.mnr.gov. ru/docs/gosudarstvennye_doklady/.
- 8. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. 2021. 988 с. https://rkc56.ru/documents/4538.
- 9. *Тронин А.А., Крицук С.Г., Киселёв А.В.* Многолетние тренды содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 259–265. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265.
- 10. *Тронин А.А., Седеева М.С., Неробелов Г.М., Васильев М.П.* Мониторинг содержания диоксида азота в атмосфере городов Европы и России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 287–297. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-287-297.
- 11. Air pollution // Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment, 2022 update. Geneva: World Health Organization. 2022. 200 p.
- 12. *Barkley M. P., Abad G., Kurosu T. P. et al.* OMI air-quality monitoring over the Middle East // Atmospheric Chemistry and Physics. 2017. V. 17. P. 4687–4709. https://doi.org/10.5194/acp-17-4687-2017.
- 13. *Beirle S.*, *Platt U.*, *Wenig M. et al.* Highly resolved global distribution of tropospheric NO₂ using GOME narrow swath mode data // Atmospheric Chemistry and Physics. 2004. V. 4. P. 1913–1924. https://doi. org/10.5194/acp-4-1913-2004.
- 14. *Boersma K. F., Eskes H. J., Brinksma E. J.* Error analysis for tropospheric NO₂ retrieval from space // J. Geophysical Research. 2004. V. 109. Iss. 4. Article D04311. https://doi.org/10.1029/2003JD003962.
- 15. *Boersma K. F., Eskes H. J., Dirksen R. J. et al.* An improved tropospheric NO₂ column retrieval algorithm for the Ozone Monitoring Instrument // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. V. 4. P. 1905–1928. https://doi.org/10.5194/amt-4-1905-2011.
- Bovensmann H., Burrows J. P., Buchwitz M. et al. SCIAMACHY Mission objectives and measurement modes // J. Atmospheric Sciences. 1999. V. 56. Iss. 2. P. 127–150. DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2.
- Burrows J. P., Weber M., Buchwitz M. et al. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission, instrument concept, and first scientific results // J. Atmospheric Sciences. 1999. V. 56. Iss. 2. P. 151–175. DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0151:TGOMEG>2.0.CO;2.
- 18. *Callies J., Corpaccioli E., Eisinger M., Hahne A., Lefebvre A.* GOME-2-MetOp's second-generation sensor for operational ozone monitoring // ESA Bull. 2000. V. 102. P. 28–36.
- Dang R., Jacob D. J., Shah V. et al. Background nitrogen dioxide (NO₂) over the United States and its implications for satellite observations and trends: effects of nitrate photolysis, aircraft, and open fires // Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. V. 23. P. 6271–6284. https://doi.org/10.5194/acp-23-6271-2023.
- Dentener F.J., Crutzen P.J. A global 3D model of the ammonia cycle // J. Atmospheric Chemistry. 1994. V. 19. P. 331–369.
- Dirksen R. J., Boersma K. F., Eskes H. J. et al. Evaluation of stratospheric NO₂ retrieved from the Ozone Monitoring Instrument: intercomparison, diurnal cycle and trending // J. Geophysical Research. 2011. V. 116. Iss. D8. Article D08305. https://doi.org/10.1029/2010JD014943.
- Fu D., Kulawik S. S., Miyazaki K. et al. Retrievals of tropospheric ozone profiles from the synergism of AIRS and OMI: methodology and validation // Atmospheric Measurement Techniques. 2018. V. 11. P. 5587–5605. https://doi.org/10.5194/amt-11-5587-2018.
- 23. *Georgoulias A. K., Stammes P., Boersma K. F. et al.* Trends and trend reversal detection in 2 decades of tropospheric NO₂ satellite observations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. V. 19. P. 6269–6294. https://doi.org/10.5194/acp-19-6269-2019.
- 24. *He Y, Uno I., Wang Z. et al.* Variations of the increasing trend of tropospheric NO₂ over central east China during the past decade // Atmospheric Environment. 2007. V. 41. P. 4865–4876. DOI: 10.1016/j. atmosenv.2007.02.009.
- Hilboll A., Richter A., Burrows J. P. Long-term changes of tropospheric NO₂ over megacities derived from multiple satellite instruments // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. P. 4145–4169. https:// doi.org/10.5194/acp-13-4145-2013.
- Huang Z., Kong S., Seo J. et al. Achievements and challenges in improving air quality in China: Analysis of the long-term trends from 2014 to 2022 // Environment International. 2024. V. 183. Article 108361. https:// doi.org/10.1016/j.envint.2023.108361.
- Ialongo I., Virta H., Eskes H. et al. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 precursor NO₂ observations with ground-based measurements in Helsinki // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13. P. 205– 218. https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020.
- 28. *Inness A., Ribas R., Engelen R.* The use of Sentinel-5P air quality data by CAMS. ECMWF Newsletter. 2019. No. 159. P. 25–30. DOI: 10.21957/ko66ais8yp.

- 29. *Koelemeijer R. B., Stammes P., Hovenier J. W. et al.* A fast method for retrieval of cloud parameters using oxygen A band measurements from the Global Ozone Monitoring Experiment // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 3475–3490. DOI: 10.1029/2000JD900657.
- Lamsal L. N., Duncan B. N., Yoshida Y. et al. U.S. NO₂ trends (2005–2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) // Atmospheric Environment. 2015. V. 110. P. 130–143. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.055.
- 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. 2011. V. 116. Article D06304. DOI: 10.1029/2010JD014758.
- 32. *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.
- 33. *Martin R. V.* Satellite remote sensing of surface air quality // Atmospheric Environment. 2008. V. 42. P. 7823–7843. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.018.
- Martin R. V., Fiore A. M., Van Donkelaar A. Space-based diagnosis of surface ozone sensitivity to anthropogenic emissions // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. Iss. 6. Article L06120. DOI: 10.1029/2004GL019416.
- Munro R., Lang R., Klaes D. et al. The GOME-2 instrument on the MetOp series of satellites: instrument design, calibration, and level 1 data processing an overview // Atmospheric Measurement Techniques. 2016. V. 9. P. 1279–1301. https://doi.org/10.5194/amt-9-1279-2016.
- 36. Ozone Monitoring Instrument (OMI) Data User's Guide. 2017. https://acp.copernicus.org/preprints/acp-2017-487/acp-2017-487.pdf.
- 37. *Patel F.* Using Sentinel-5P to monitor Air Quality changes since the Coronavirus outbreak: a UK Expert View / National Center for Employee Ownership. 2020. https://www.nceo.ac.uk/article/using-sentinel-5p-to-monitor-air-quality-changes-since-the-coronavirus-outbreak-a-uk-expert-view/.
- Platt U. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) // Air monitoring by spectroscopic techniques. Chemical Analysis Series. 1994. Vol. 127. P. 27–84.
- 39. *Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G. et al.* Six years of IKFS-2 global ozone total column measurements // Remote Sensing. 2023. V. 15. Article 2481. https://doi.org/10.3390/rs15092481.
- 40. *Richter A.*, *Begoin M.*, *Hilboll A. et al.* An improved NO₂ retrieval for the GOME-2 satellite instrument // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. V. 4. P. 1147–1159. DOI: 10.5194/amt-4-1147-2011.
- Sedeeva M., Tronin A., Nerobelov G. et al. Variation of tropospheric NO₂ on the territories of Saint Petersburg and Leningrad Region according to remote sensing data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. P. 669–679. https://doi.org/10.1134/S0001433821200032.
- 42. *Stammes P.* Spectral radiance modelling in the UV-Visible range // Current Problems in Atmospheric Radiation. 2001. P. 385–388.
- 43. United Nations Environment Programme: Annual Report. 2021. https://www.unep.org/resources/ annual-report-2021.
- Vandaele A. C., Fayt C., Hendrick F. et al. An intercomparison campaign of ground-based UV-visible measurements of NO₂, BrO, and OCIO slant columns: Methods of analysis and results for NO₂ // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. Iss. D8. Article D08305. 27 p. https://doi.org/10.1029/2004JD005423.
- 45. *Wallace J. M.*, *Hobbs P.V.* Atmospheric science: an introductory survey. 2nd ed. Academic Press, 2006. 504 p.
- Zeng J., Vollmer B. E., Ostrenga D. M., Gerasimov I. V. Air quality satellite monitoring by TROPOMI on Sentinel-5P // American Geophysical Union, Fall Meeting. 2018. Article A33J-3280. https://ntrs.nasa.gov/ citations/20180008621.
- Zhang Q., Boersma K. F., Zhao B. et al. Quantifying daily NO_x and CO₂ emissions from Wuhan using satellite observations from TROPOMI and OCO-2 // Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. V. 23. P. 551– 563. https://doi.org/10.5194/acp-23-551-2023.

Satellite observation datasets and web-services of gas and aerosol composition of the atmosphere

A. A. Tronin, M. P. Vasiliev, G. M. Nerobelov, V. S. Urmanov, A. V. Kiselev

Saint Petersburg Federal Research Center RAS, Saint Petersburg 199178, Russia E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

The review focuses on available satellite measurements of the main gaseous and aerosol pollutants and the means by which the data are provided. The article discusses the main publicly available satellite measurement datasets, which are distributed to the end user either by posting the data on a research team's web page (for example, a laboratory's website) or through a specially developed web service. According to the study, NASA's GES DISC (National Aeronautics and Space Administration, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) web service is the most effective in terms of air quality analysis. This is ensured by the free dissemination of pollutant content information based on measurements by two existing high-quality measuring instruments - OMI (Ozone Monitoring Instrument) and TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) (and not only them); providing high temporal and spatial resolution data and data with different levels of processing (from L1 (Level 1) to L4 (Level 4)); regular data updating on the service; convenience and speed of obtaining satellite data, due to the built-in web service. However, when conducting research based on satellite measurement data, it is important not to limit to one source of information, but to consider all available datasets. This is due, for example, to the use by individual scientists of different algorithms for retrieving the content of pollutants in the atmosphere, to different measurement errors of satellite instruments, their spatial resolution, etc.

Keywords: air pollution, satellite measurements, web services

Accepted: 18.09.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-97-116

References

- 1. Bril A.A., Konstantinova A.M., Loupian E.A., Burtsev M.A., Capabilities of IKI-Monitoring shared use center operation with satellite monitoring–based trace gas component data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 85–95 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
- 2. *Doklad "O sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2021 godu"* (On the state of the environment in Moscow in 2021), Moscow, 2022, 234 p. (in Russian), https://www.mos.ru/upload/content/files/d6fb-4810f42661667ce2d1b353dbc5ea/2022_all.pdf.
- 3. *Ezhegodnik sostoyaniya i zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii* (Yearbook of the air state and pollution in cities in Russia), Roshydromet, 2022, 254 p. (in Russian), https://www.meteorf.gov.ru/ product/infomaterials/ezhegodniki/.
- 4. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 5. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A. et al., Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
- Morozova A. E., Sizov O. S., Elagin P. O. et al., Integral assessment of atmospheric air quality in the largest cities of Russia based on TROPOMI (Sentinel-5P) data for 2019–2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 23–29 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39.
- 7. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2022 godu: Gosudarstvennyi doklad* (On the status and protection of the environment of the Russian Federation in 2022: State report), Moscow: Ministry of natural resources and environment of the Russian Federation; MSU, 2023, 686 p. (in Russian), https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/.
- 8. SanPiN 1.2.3685-21 Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya (Hygienic standards and requirements for ensuring the safety

and (or) harmlessness of environmental factors to humans), 2021, 988 p. (in Russian), https://rkc56.ru/documents/4538.

- 9. Tronin A. A., Kritsuk S. G., Kiselev A. V., Estimation of multiyear changes in nitrogen oxide concentrations over Russia from satellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 259–265 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265.
- Tronin A. A., Sedeeva M. S., Nerobelov G. M., Vasiliev M. P., Monitoring of nitrogen dioxide content in the atmosphere of cities in Europe and Russia using satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 1, pp. 287–297 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-287-297.
- 11. Air pollution, In: *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment*, 2022 update, Geneva: World Health Organization, 2022, 200 p.
- 12. Barkley M. P., Abad G., Kurosu T. P. et al., OMI air-quality monitoring over the Middle East, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, Vol. 17, pp. 4687–4709, https://doi.org/10.5194/acp-17-4687-2017.
- 13. Beirle S., Platt U., Wenig M. et al., Highly resolved global distribution of tropospheric NO₂ using GOME narrow swath mode data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, Vol. 4, pp. 1913–1924, https://doi.org/10.5194/acp-4-1913-2004.
- 14. Boersma K.F., Eskes H.J., Brinksma E.J., Error analysis for tropospheric NO₂ retrieval from space, *J. Geophysical Research*, 2004, Vol. 109, Iss. 4, Article D04311, https://doi.org/10.1029/2003JD003962.
- Boersma K. F., Eskes H. J., Dirksen R. J. et al., An improved tropospheric NO₂ column retrieval algorithm for the Ozone Monitoring Instrument, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, Vol. 4, pp. 1905–1928, https://doi.org/10.5194/amt-4-1905-2011.
- 16. Bovensmann H., Burrows J. P., Buchwitz M. et al., SCIAMACHY Mission objectives and measurement modes, *J. Atmospheric Sciences*, 1999, Vol. 56, Iss. 2, pp. 127–150, DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2.
- 17. Burrows J. P., Weber M., Buchwitz M. et al., The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission, instrument concept, and first scientific results, *J. Atmospheric Sciences*, 1999, Vol. 56, Iss. 2, pp. 151–175, DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0151:TGOMEG>2.0.CO;2.
- 18. Callies J., Corpaccioli E., Eisinger M., Hahne A., Lefebvre A., GOME-2-MetOp's second-generation sensor for operational ozone monitoring, *ESA Bull.*, 2000, Vol. 102, pp. 28–36.
- 19. Dang R., Jacob D.J., Shah V. et al., Background nitrogen dioxide (NO₂) over the United States and its implications for satellite observations and trends: effects of nitrate photolysis, aircraft, and open fires, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, Vol. 23, pp. 6271–6284, https://doi.org/10.5194/acp-23-6271-2023.
- 20. Dentener F.J., Crutzen P.J., A global 3D model of the ammonia cycle, *J. Atmospheric Chemistry*, 1994, Vol. 19, pp. 331–369.
- Dirksen R. J., Boersma K. F., Eskes H. J. et al., Evaluation of stratospheric NO₂ retrieved from the Ozone Monitoring Instrument: intercomparison, diurnal cycle and trending, *J. Geophysical Research*, 2011, Vol. 116, Iss. D8, Article D08305, https://doi.org/10.1029/2010JD014943.
- 22. Fu D., Kulawik S. S., Miyazaki K. et al., Retrievals of tropospheric ozone profiles from the synergism of AIRS and OMI: methodology and validation, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, Vol. 11, pp. 5587–5605, https://doi.org/10.5194/amt-11-5587-2018.
- Georgoulias A. K., Stammes P., Boersma K. F. et al., Trends and trend reversal detection in 2 decades of tropospheric NO₂ satellite observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19, pp. 6269–6294, https://doi.org/10.5194/acp-19-6269-2019.
- 24. He Y., Uno I., Wang Z. et al., Variations of the increasing trend of tropospheric NO₂ over central east China during the past decade, *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41, pp. 4865–4876, DOI: 10.1016/j. atmosenv.2007.02.009.
- Hilboll A., Richter A., Burrows J. P., Long-term changes of tropospheric NO₂ over megacities derived from multiple satellite instruments, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, Vol. 13, pp. 4145–4169, https://doi. org/10.5194/acp-13-4145-2013.
- 26. Huang Z., Kong S., Seo J. et al., Achievements and challenges in improving air quality in China: Analysis of the long-term trends from 2014 to 2022, *Environment International*, 2024, Vol. 183, Article 108361, https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108361.
- Ialongo I., Virta H., Eskes H. et al., Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 precursor NO₂ observations with ground-based measurements in Helsinki, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, Vol. 13, pp. 205–218, https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020.
- 28. Inness A., Ribas R., Engelen R., The use of Sentinel-5P air quality data by CAMS, *ECMWF Newsletter*, 2019, No. 159, pp. 25–30, DOI: 10.21957/ko66ais8yp.
- 29. Koelemeijer R. B., Stammes P., Hovenier J. W. et al., A fast method for retrieval of cloud parameters using oxygen A band measurements from the Global Ozone Monitoring Experiment, *J. Geophysical Research*, 2001, Vol. 106, pp. 3475–3490, DOI: 10.1029/2000JD900657.

- 30. Lamsal L. N., Duncan B. N., Yoshida Y. et al., U. S. NO₂ trends (2005–2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI), *Atmospheric Environment*, 2015, Vol. 110, pp. 130–143, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.055.
- 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*, 2011, Vol. 116, Article D06304, DOI: 10.1029/2010JD014758.
- 32. 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, Vol. 4, pp. 1093–1101, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872333.
- 33. Martin R.V., Satellite remote sensing of surface air quality, *Atmospheric Environment*, 2008, Vol. 42, pp. 7823–7843, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.018.
- 34. Martin R. V., Fiore A. M., Van Donkelaar A., Space-based diagnosis of surface ozone sensitivity to anthropogenic emissions, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, Iss. 6, Article L06120, DOI: 10.1029/2004GL019416.
- 35. Munro R., Lang R., Klaes D. et al., The GOME-2 instrument on the MetOp series of satellites: instrument design, calibration, and level 1 data processing an overview, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, Vol. 9, pp. 1279–1301, https://doi.org/10.5194/amt-9-1279-2016.
- 36. Ozone Monitoring Instrument (OMI) Data User's Guide, 2017, https://acp.copernicus.org/preprints/acp-2017-487/acp-2017-487.pdf.
- 37. Patel F., Using Sentinel-5P to monitor Air Quality changes since the Coronavirus outbreak: a UK Expert View, National Center for Employee Ownership, 2020, https://www.nceo.ac.uk/article/ using-sentinel-5p-to-monitor-air-quality-changes-since-the-coronavirus-outbreak-a-uk-expert-view/.
- 38. Platt U., Differential optical absorption spectroscopy (DOAS), *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques*, *Chemical Analysis Series*, 1994, Vol. 127, pp. 27–83.
- 39. Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G. et al., Six years of IKFS-2 global ozone total column measurements, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, Article 2481, https://doi.org/10.3390/rs15092481.
- 40. Richter A., Begoin M., Hilboll A. et al., An improved NO₂ retrieval for the GOME-2 satellite instrument, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, Vol. 4, pp. 1147–1159, DOI: 10.5194/amt-4-1147-2011.
- 41. Sedeeva M., Tronin A., Nerobelov G. et al., Variation of tropospheric NO₂ on the territories of Saint Petersburg and Leningrad Region according to remote sensing data, *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, pp. 669–679, https://doi.org/10.1134/S0001433821200032.
- 42. Stammes P., Spectral radiance modelling in the UV-Visible range, *Current Problems in Atmospheric Radiation*, 2001, pp. 385–388.
- 43. United Nations Environment Programme, 2021: Annual Report, 2021, https://www.unep.org/resources/ annual-report-2021.
- Vandaele A. C., Fayt C., Hendrick F. et al., An intercomparison campaign of ground-based UV-visible measurements of NO₂, BrO, and OCIO slant columns: Methods of analysis and results for NO₂, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, Iss. 8, Article D08305, 27 p., https://doi.org/10.1029/2004JD005423.
 Wallace J. M., Hobbs P. V., *Atmospheric science: an introductory survey*, 2nd ed., Academic Press, 2006,
- 45. Wallace J. M., Hobbs P. V., *Atmospheric science: an introductory survey*, 2nd ed., Academic Press, 2006, 504 p.
- 46. Zeng J., Vollmer B. E., Ostrenga D. M., Gerasimov I. V., Air quality satellite monitoring by TROPOMI on Sentinel-5P, *American Geophysical Union*, *Fall Meeting*, 2018, Article A33J-3280, https://ntrs.nasa.gov/citations/20180008621.
- 47. Zhang Q., Boersma K. F., Zhao B. et al., Quantifying daily NO_x and CO₂ emissions from Wuhan using satellite observations from TROPOMI and OCO-2, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, Vol. 23, pp. 551–563, https://doi.org/10.5194/acp-23-551-2023.