Московский экономический журнал. № 12. 2023
Moscow economic journal. № 12. 2023

Научная статья

Original article

УДК 504.3.054

doi: 10.55186/2413046X_2023_8_12_662

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ О СОДЕРЖАНИИ SO2 В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ НАСЕЛЁННЫХ МЕСТ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ХИМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ ENSEMBLE И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

COMPARISON OF DATA ON THE SO2 CONTENT IN THE ATMOSPHERIC AIR OF POPULATED AREAS OBTAINED USING THE ENSEMBLE CHEMICAL TRANSPORT SYSTEM AND GROUND MEASUREMENTS

Лукьянова Татьяна Семёновна, д.г.н., профессор кафедры геоэкологии и природопользования, ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству, E-mail: LukyanovaTS@guz.ru

Крючков Сергей Андреевич, ассистент кафедры геоэкологии и природопользования, ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству, E-mail: sergeykru8@yandex.ru

Lukyanova Tatyana Semenovna, doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Geoecology and Environmental Management, State University of Land Management, E-mail: LukyanovaTS@guz.ru

Kryuchkov Sergey Andreevich, assistant of the Department of Geoecology and Environmental Management, State University of Land Management, E-mail: Tanya.vorobyeva135@gmail.com

Аннотация. Спутниковые технологии сегодня могут с высоким разрешением определить количество диоксида серы в атмосферном воздухе. Однако, они пока не позволяют измерить точные концентрации на конкретных высотах. Эту задачу

сейчас выполняют химические транспортные модели. Одна из них ENSEMBLE – разработанная службой мониторинга атмосферы «Коперникус». Главная цель исследования: сравнить данные ENSEMBLE с данными наземного наблюдения. В результате сравнения определено, что модель даёт показания выше измеренных на земле. Сегодня её можно использовать для оценки загрязнения воздуха на больших территориях (от 11x11 км). В перспективном будущем область оценки, вероятно, станет более локальной.

Abstract. Satellite technologies today can determine the amount of sulfur dioxide in the atmospheric air with high resolution. However, they do not yet allow accurate concentrations to be measured at specific heights. Chemical transport models are currently performing this task. One of them is ENSEMBLE, developed by the Copernicus Atmospheric Monitoring Service. The main purpose of the study is to compare ENSEMBLE data with ground-based surveillance data. As a result of the comparison, it was determined that the model gives readings higher than those measured on earth. Today, it can be used to assess air pollution in large areas (from 11x11km). In the long-term future, the assessment area is likely to become more local.

Ключевые слова: атмосферный воздух, диоксид серы, мониторинг, спутниковые технологии, химическая транспортная модель, служба мониторинга атмосферы «Коперникус», ENSEMBLE

Keywords: atmospheric air, sulfur dioxide, monitoring, satellite technologies, chemical transport model, Copernicus atmospheric monitoring service, ENSEMBLE

Введение

11 ноября 2014 года Европейским Космическим Агентством (ESA) была создана служба мониторинга атмосферы «Коперникус» (CAMS). Главные задачи этой службы – проведение мониторинга за газовым состоянием атмосферы, изучение степени загрязнённости воздуха и количества парниковых газов на территории Европы и всего мира [7]. Данные в эту организацию поступают путём спутникового и наземного мониторинга за состоянием атмосферы. Основными спутниковыми инструментами, от которых CAMS получает информацию о

качестве воздуха, являются: Ozone Monitoring Instrument (OMI) на спутнике EOS-Aura (NASA), TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) на спутнике Sentinel-5P (ESA), SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY (SCIAMACHY) на спутнике ENVISAT (ESA) и ряд других [9,10]. Всего загрязнённость атмосферы по состоянию на сентября 2021 г. исследуют минимум 12 приборов, которые в общей сложности могут определить более 20 различных веществ, среди которых озон (O3), оксиды азота (NO) и (NO2), диоксид серы (SO2), аммиак (NH3) и мелкодисперсные частицы (PM 2,5) [11].

В исследовании отдаётся предпочтение диоксиду серы (SO2). Выбор этого вещества обусловлен тем, что этот газ токсичен, класс его опасности – 3. Максимально разовая ПДК для атмосферного воздуха населённых мест - 0,5 мг/м. куб. (500 мкг/м. куб). Высокие концентрации диоксида серы в атмосферном воздухе могут приводить к нарушению функции дыхания у живых существ и существенному увеличению у них болезней дыхательных путей. От вещества также могут пострадать и растения, газ может вызвать серьезное повреждение листьев в виде локализованных разрушений ткани (некрозов). Основные источники диоксида серы в тропосфере: выбросы от тепловых электростанций, работающих на твёрдом и жидком топливе [2].

Материалы и методы

Спутниковое измерение SO2 в атмосферном воздухе

Определение диоксида серы в атмосфере Земли спутниковым оборудованием (спектрометрами) происходит путём выявления поглощения этим веществом света в определённых спектральных диапазонах.

Содержание общего количества диоксида серы в атмосферном слое можно определить в диапазоне от 308 до 325 нм., диоксид серы в тропосфере при это определяется в диапазоне от 310 до 325 нм.

Спутниковое измерение диоксида серы в воздухе проводятся в единицах Добсона (определяет толщину слоя), миллионных долях, либо в молекулах вещества на определённом измеряемом квадрате земли практически по всему

атмосферному слою, то есть измеряется всё определяемое вещество в определённом квадрате атмосферы. (Рис. 1).

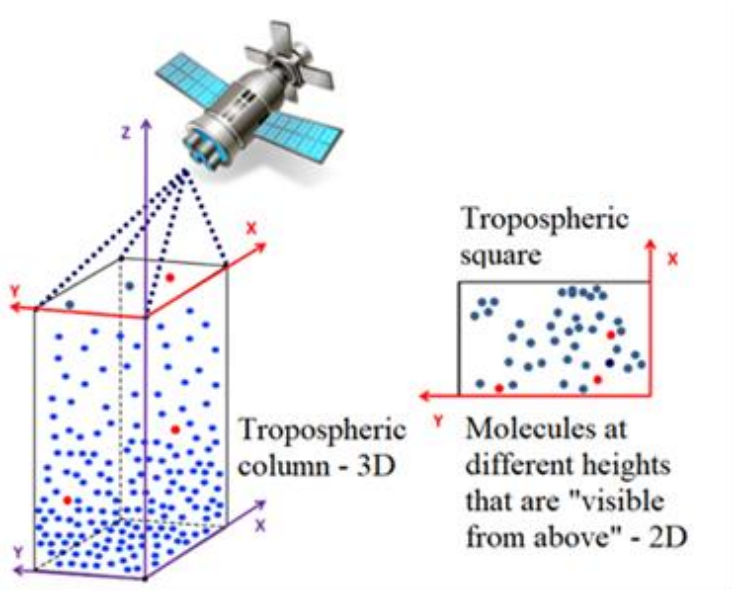

Рисунок 1. **Принцип спутникового определения химических веществ в атмосфере Земли [2]**

Для прибора SCIAMACHY, например, такой квадрат равен территории 200x30 км, для OMI 24x13 км, прибор TROPOMI (Sentinel-5P) имеет разрешение 3,5 на 7 км [12]. Данные от каждого инструмента находятся в свободном доступе и публикуются на официальных сайтах Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА, США), Европейского космического агентства (Европейский Союз) и ряде других интернет-порталах [8]. Пример данных, получаемых от инструмента TROPOMI показан на рисунке 2. Спутниковые наблюдения производятся для одной территории в среднем раз в сутки, реже раз в 2 дня и позволяют оценить загрязнённость атмосферы практически над каждым крупным населённым пунктом или территории нашей планеты.

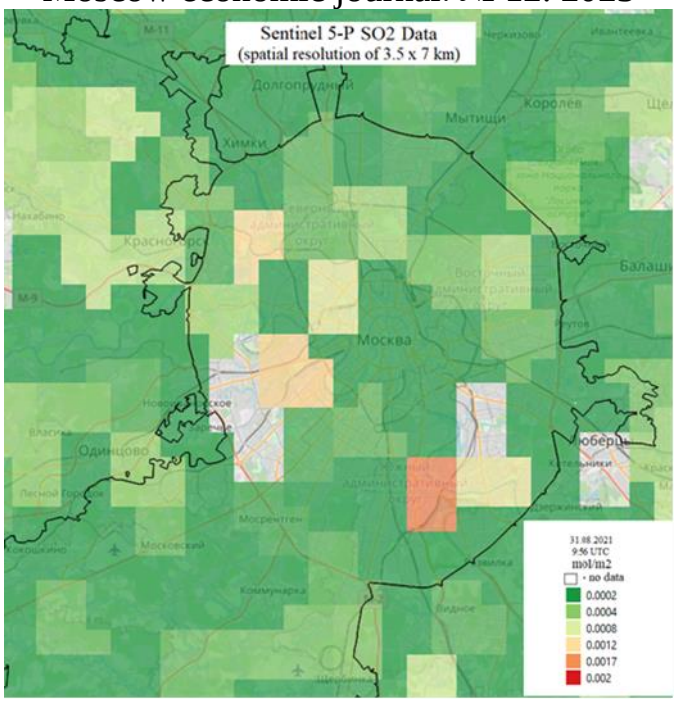

Рисунок 2. **Фрагмент картосхемы Москвы и ближнего Подмосковья с наложением данных прибора TROPOMI (Sentinel-5P) по суммарному содержанию SO2 в атмосфере на дату 31.08.2021 года, время 9:56 UTC. Концентрация в mol/m2 [8]**

Цифровые транспортные химические модели

Прямые спутниковые данные не показывают конкретные высоты высоких и низких концентраций веществ в атмосфере, однако в настоящее время существуют минимум 8 экспериментальных транспортных химических моделей, которые с помощью дополнительных данных (о погоде, направлении ветра, атмосферного давления и проч.) могут приближённо рассчитывать концентрации веществ на определённых высотах и в конкретных квадратах в более привычных единицах мкг или мг/куб. м. Расчёты происходят на суперкомпьютерах разных организаций Европы [10].

Основные модели, рассчитывающие содержание диоксида серы: EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) (Норвежский метеорологический институт), DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model) (Danish Air Quality Monitoring Program) (Орхусский университет, Дания), Multi-scale Atmospheric

Transport and Chemistry (MATCH) (Шведский институт гидрологии и метеорологии) и модель ENSEMBLE разработанная непосредственно CAMS – дающая медианное значение нижеперечисленных моделей [9 с.1-3] [10].

Рассчитанные данные каждой модели находятся в свободном доступе и публикуются ежедневно на официальном сайте службы мониторинга атмосферы «Коперникус» (CAMS). Пример данных которая даёт модель ENSEMBLE представлен на рисунке 3. Визуализация выполнена в программе QGIS. Данные о ветре за это время получены из архива метеостанции, которая находится на ВДНХ [1].

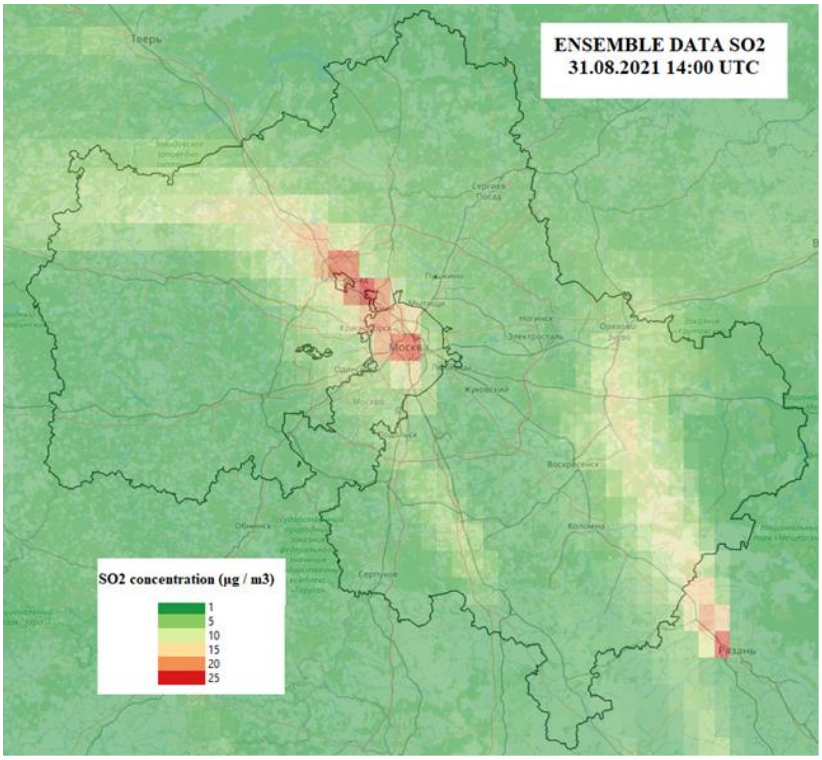

Рисунок 3. Визуализация данных модели ENNSEMBLE по концентрации SO2 в атмосферном воздухе на уровне земли в Московском регионе на 14:00 UTC (17:00 МСК) 31.08.2021 года, ветер Ю-В, 1 м/с [1,6]

Стоит заметить, что расчёты всех моделей производятся с определённым разрешением, у модели ENSEMBLE – это 0,1x0,1 градус (территория приближённо равна 11x11 км.) Это самое высокое разрешение среди всех

моделей. Концентрация веществ отображается одинаковой на всей площади квадрата [6].

Основанная цель исследования: сравнить показания ENSEMBLE с данными наземного наблюдения и определить перспективность использования данных модели для геоэкологических исследований загрязнения воздуха на территориях, где отсутствует постоянный наземный мониторинг.

Определение точности показаний ENSEMBLE по содержанию SO2 на поверхности земли проводится путём сравнения данных модели с измерениями, проводимыми организацией Мосэкомониторинг в городе Москва.

По состоянию на 01.09.2021 года на территории города у организации работали 40 датчиков определения концентраций диоксида серы в атмосферном воздухе, находящихся в разных точках города. Замеры концентраций диоксида серы производится круглосуточно с часовым интервалом [5]. Для сравнения наземных показаний и данных ENSEMBLE выбраны 3 датчика находящиеся по адресам: ул. Маршала Полубоярова, д. 8; Очаковское шоссе, дом 11, корпус 1 и Малая Сухаревская площадь, дом 1, строение 1. Графическое представление территории, на которой происходит сравнение представлено на рисунке 4. Визуализация выполнена в программе QGIS.

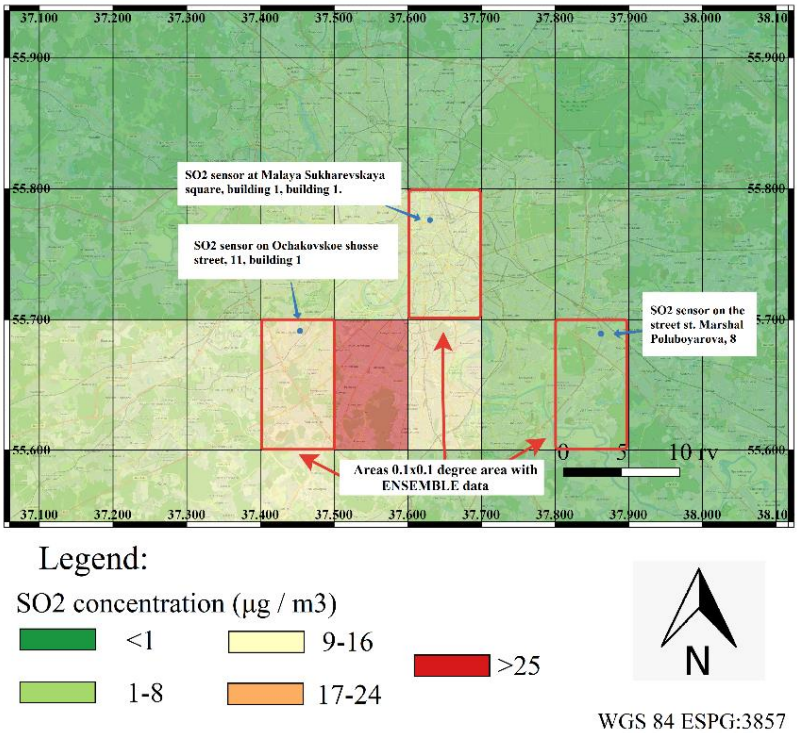

Рисунок 4. Обозначение территории в г. Москва, на которой сравнивались показания концентраций SO2 в атмосферном воздухе модели ENNSEMBLE и данные наземного мониторинга [5,6]

В работе сравниваются почасовые данные в период с 0:00 часов 01.09.2021 года по 0:00 часов 02.09.2021 года. Всего проведено 72 сравнения наземных и рассчитанных с помощью ENSEMBLE данных. Графики сравнения по трём контрольным областям представлены на рисунке 5.

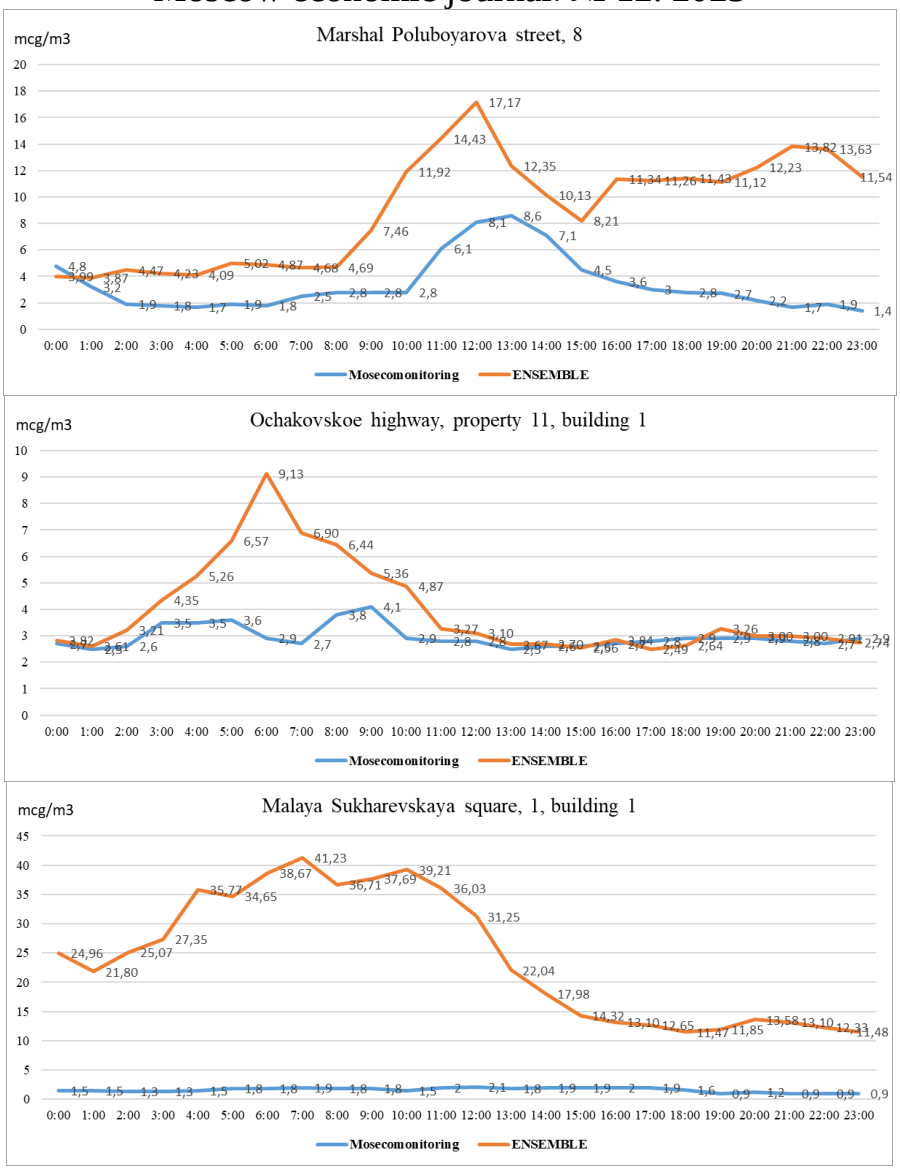

Рисунок 5. **Графики изменения концентраций диоксида серы в атмосферном воздухе на исследуемой территории, построенные на основе данных модели ENSEMBLE и показаний наземного измерения [5, 6]**

Результаты исследования

В результате сравнения количества показаний выявлено следующее: показания модели ENSEMBLE превышали наземные значения в 67 из 72 случаев, что составляет приближённо 97,7 %. Наибольшее количество случаев, когда данные модели ENSEMBLE превышали наземные зафиксировано по адресу: Малая Сухаревская площадь, дом 1, строение 1. В этом месте все 24 показания были больше данных полученных на земле. Наименьшее количество случаев,

когда данные ENSEMBLE были больше наземных – зафиксировано по адресу Очаковском шоссе, 11, 1, где показания модели превышали наземные в 20 из 24 раз.

По результатам сравнения концентраций диоксида серы выявлено следующее: в целом показания модели ENSEMBLE различаются на 10,57 единиц. Наибольшее расхождение данных модели от наземных значений зафиксировано у датчика, который располагается на улице Малая Сухаревская площадь, 1, стр. 1 – 39,33 единиц в 7:00 утра. В это время цифровая модель показывала концентрацию 41,23 мкг/ куб.м., а наземное наблюдение 1,9 мкг/куб.м. Наименьшее расхождение концентраций составляет 0,10 единиц и наблюдалось в 1:00 по адресу Очаковское шоссе, дом 11, корпус 1 (концентрация ENSEMBLE – 2,6 мкг/ куб.м., Мосэкомониторинг – 2,5 мкг/ куб.м). Наземные показания в среднем превышали значения ENSEMBLE на 0,31 ед. Максимальное расхождение наблюдалось в 0:00 часов по адресу ул. Маршала Полубоярова – 0,8 ед. (показание ENSEMBLE – 3,99, Мосэкомониторинг – 4,8 мкг/куб. м). Минимальное расхождение 0,04 ед. наблюдалось на Очаковское шоссе в 15:00. Сравнения показаний представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение показаний модели ENSEMBLE и данных наземного наблюдения [3, 4]

Измерения	**Показания модели ENSEMBLE выше данных Мосэкомониторинга**	**Показания Мосэкомониторинга выше данных модели ENSEMBLE**
Процент количества показаний, %	≈97,7	≈2,3
Максимальное расхождение концентраций, ед. изм.	39,33	0,8
Минимальное расхождение концентраций, ед. изм.	0,1	0,04
Среднее расхождение концентраций, ед. изм.	10,57	0,31
Общее среднее расхождение, ед.	9,86	

Сравнивая рассчитанные спутниковые данные модели ENSEMBLE и данные наземного наблюдения организации Мосэкомониторинг, напрашиваются следующие выводы:

1. Показания концентраций диоксида серы по модели ENSEMBLE в большинстве случаев, больше измеренных на земле.

2. Максимальное расхождение показаний на основе 72 сравнений может доходить до 39,33 ед. (показания модели ENSEMBLE могут быть в 22 раза больше показаний, измеренных на земле).

3. В среднем данные различаются на 9,86 единиц.

Заключение

В настоящее время космические аппараты могут с довольно высоким разрешением определять общее количество диоксида серы в атмосферном слое. Это позволяет оценивать загрязнённость атмосферы и выявлять крупные источники выбросов этого вещества над конкретными городами и уже даже над конкретными районами крупных городов. В ближайшем будущем, в связи с запуском спутника Sentinel 5A в 2021-2022 году [12], территория определения диоксида серы вероятно будет ещё более локальной.

Пока развитие космических технологий не позволяет определять точную высоту высоких и низких концентраций диоксида серы в тропосферном слое атмосферы, однако это задачу сейчас выполняют экспериментальные транспортные химические модели, которые на основе спутниковых данных и наземных наблюдений могут приближённо определять концентрацию вещества даже на уровне земли.

В результате сравнения данных модели ENSEMBLE с данными наземного наблюдения, сделаны выводы о том, что, рассчитанные показания имеют различия и часто превышают значения, измеренные на земле. Это частично обусловлено разрешением модели ENSEMBLE (0,1x0,1 градус). Сегодня рекомендуется использовать данные модели для исследования качества воздуха

на больших территорий, а на локальном уровне (менее 0,1х0,1 градус) отдавать предпочтение наземному мониторингу.

Список источников

1. Архив погоды в Москве (ВДНХ) // Интернет портал «Расписание погоды RP5». – 2021 [Электронный ресурс] – URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Москве_(ВДНХ) (дата обращения: 15.09.2021)
2. Загрязняющие вещества и их влияние на здоровье человека // Ozone program // Экологический сайт ПГУ им. С. Торайгырова [Электронный ресурс] – URL: https://eco.psu.kz/index.php?option=com_content&view=article&id=78:2012-04-26-08-31-19&catid=36:2012-04-26-08-24-22&Itemid=2 (дата обращения: 10.09.2021)
3. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 203-218
4. Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Березин Е.В., Коновалов И.Б., Блинов Д.В., Кирсанов А.А. Сравнение рассчитанных с помощью химических транспортных моделей приземных концентраций загрязняющих веществ с данными измерений в Московском регионе Оптика атмосферы и океана, 30, № 1, 2017
5. Электронная карта «Чем дышит Москва?» // Совместный проект организаций Мосэкомониторинг и Greenpeace [Электронный ресурс] – URL: http://arcgis.greenpeace.org/air/ (дата обращения: 15.09.2021)
6. CAMS European air quality forecasts // Copernicus Atmosphere Monitoring Service [Электронный ресурс] – URL: https://ads.atmosphere.copernicus.eu /cdsapp#!/dataset/cams-europe-air-quality-forecasts?tab=overview / (дата обращения: 14.09.2021)
7. Copernicus Climate Change and Atmosphere Monitoring Services launched // European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. – 2014 [Электронный ресурс]

– URL: https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/ 2014/copernicus-climate-change-and-atmosphere-monitoring-services (дата обращения: 14.09.2021)

8. Copernicus Open Access Hub (Sentinel-5P) // ESA, - [Электронный ресурс] – URL: https://scihub.copernicus.eu/ (дата обращения: 17.09. 2021)

9. ENSEMBLE factsheet // Copernicus Atmosphere Monitoring Service, - 2016 [Электронный ресурс] – URL:https://atmosphere.copernicus.eu/ sites/default/files/201802/ENSEMBLE_Fact_Sheet_0.pdf (дата обращения: 14.09. 2021)

10. Regional air quality production systems Copernicus // Atmosphere Monitoring Service, – 2019 [Электронный ресурс] – URL: https://atmosphere.copernicus.eu/documentation-regional-systems/ (дата обращения: 15.09.2021)

11. Satellite observations // CAMS [Электронный ресурс] – URL: https://atmosphere.copernicus.eu/satellite-observations (дата обращения: 14.09. 2021)

12. TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) // Homepage Julien Chimot: a journey in Earth observation satellite science [Электронный ресурс] – URL: https://julien-chimot-research.blog/tropospheric-monitoring-instrument-tropomi/ (дата обращения: 16.09.2021)

References

1. Arkhiv pogody` v Moskve (VDNH) // Internet portal «Raspisanie pogody` RP5». – 2021 [E`lektronny`j resurs] – URL: https://rp5.ru/Arxiv_ pogody`_v_Moskve_(VDNH) (data obrashheniya: 15.09.2021)

2. Zagryaznyayushhie veshhestva i ix vliyanie na zdorov`e cheloveka // Ozone program // E`kologicheskij sajt PGU im. S. Torajgy`rova [E`lektronny`j resurs] – URL: https://eco.psu.kz/index.php?option=com_content&view=article&id=78:2012-04-26-08-31-19&catid=36:2012-04-26-08-24-22&Itemid=2 (data obrashheniya: 10.09.2021)

3. Kuzneczova I.N., Shaly`gina I.Yu., Naxaev M.I., Tkacheva Yu.V., Rivin G.S., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Lezina E.A. Sistema prognozirovaniya kachestva

vozduxa na osnove ximicheskix transportny`x modelej Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy`. 2019. № 4 (374). S. 203-218

4. Shaly`gina I.Yu., Naxaev M.I., Kuzneczova I.N., Berezin E.V., Konovalov I.B., Blinov D.V., Kirsanov A.A. Sravnenie rasschitanny`x s pomoshh`yu ximicheskix transportny`x modelej prizemny`x koncentracij zagryaznyayushhix veshhestv s danny`mi izmerenij v Moskovskom regione Optika atmosfery` i okeana, 30, № 1, 2017

5. E`lektronnaya karta «Chem dy`shit Moskva?» // Sovmestny`j proekt organizacij Mose`komonitoring i Greenpeace [E`lektronny`j resurs] – URL: http://arcgis.greenpeace.org/air/ (data obrashheniya: 15.09.2021)

6. CAMS European air quality forecasts // Copernicus Atmosphere Monitoring Service [Электронный ресурс] – URL: https://ads.atmosphere.copernicus.eu /cdsapp#!/dataset/cams-europe-air-quality-forecasts?tab=overview / (дата обращения: 14.09.2021)

7. Copernicus Climate Change and Atmosphere Monitoring Services launched // European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. – 2014 [Электронный ресурс] – URL: https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/ 2014/copernicus-climate-change-and-atmosphere-monitoring-services (дата обращения: 14.09.2021)

8. Copernicus Open Access Hub (Sentinel-5P) // ESA, - [Электронный ресурс] – URL: https://scihub.copernicus.eu/ (дата обращения: 17.09. 2021)

9. ENSEMBLE factsheet // Copernicus Atmosphere Monitoring Service, - 2016 [Электронный ресурс] – URL:https://atmosphere.copernicus.eu/ sites/default/files/201802/ENSEMBLE_Fact_Sheet_0.pdf (дата обращения: 14.09. 2021)

10. Regional air quality production systems Copernicus // Atmosphere Monitoring Service, – 2019 [Электронный ресурс] – URL: https://atmosphere.copernicus.eu/documentation-regional-systems/ (дата обращения: 15.09.2021)

11. Satellite observations // CAMS [Электронный ресурс] – URL: https://atmosphere.copernicus.eu/satellite-observations (дата обращения: 14.09. 2021)

12. TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) // Homepage Julien Chimot: a journey in Earth observation satellite science [Электронный ресурс] – URL: https://julien-chimot-research.blog/tropospheric-*monitoring-instrument-tropomi/ (дата обращения: 16.09.2021)*

Для цитирования: Лукьянова Т.С., Крючков С.А. Сравнение данных о содержании SO2 в атмосферном воздухе населённых мест, полученных с помощью химической транспортной модели ENSEMBLE и наземных измерений // Московский экономический журнал. 2023. № 12. URL: https://qje.su/rekreacia-i-turizm/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-12-2023-60/

© Лукьянова Т.С., Крючков С.А., 2023. Московский экономический журнал, 2023, № 12.