

Возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа концентраций диоксида азота в атмосфере крупных источников загрязнений

А. М. КОНСТАНТИНОВА^{1,*}, А. А. БРИЛЬ¹, Е. А. ЛУПЯН¹, А. В. КАШНИЦКИЙ¹,
В. П. САВОРСКИЙ^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН, 117997, Москва, Россия

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141190, Фрязино, Россия

*Контактный автор: Константинова Анна Михайловна, e-mail:
konstantinova@d902.iki.rssi.ru

Поступила 07 декабря 2023 г., принята в печать 21 февраля 2023 г.

В работе демонстрируются основные возможности Центра коллективного пользования “ИКИ-Мониторинг” и технологии объектного мониторинга для анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов на примере выбросов диоксида азота. Описываются вопросы выделения основных источников выбросов данного газа. Приводятся примеры результатов обработки данных с концентрацией диоксида азота в атмосфере над городами-миллионниками России.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, малые газовые составляющие, диоксид азота, TROPOMI, ЦКП “ИКИ-Мониторинг”.

Цитирование: Константинова А.М., Бриль А.А., Лупян Е.А., Кашницкий А.В., Саворский В.П. Возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа концентраций диоксида азота в районах расположения крупных источников загрязнений. Вычислительные технологии. 2024; 29(3):92–102. DOI:10.25743/ICT.2024.29.3.008.

Введение

В настоящее время все большую актуальность и важность приобретают задачи мониторинга качества воздуха в силу постоянно растущего антропогенного воздействия на окружающую среду [1]. Такой мониторинг стал возможен благодаря данным спутников Envisat (прибор SCIAMACHY), Aura (прибор OMI), Terra (прибор MOPITT), Sentinel-5P (прибор TROPOMI). При мониторинге атмосферы требуется учитывать множество факторов.

В статье демонстрируются возможности анализа концентрации диоксида азота (NO_2) с использованием данных прибора TROPOMI [2]. Рассматриваются вопросы выделения основных источников выбросов этого газа. Приводятся примеры результатов обработки данных по концентрации NO_2 с помощью технологии объектного мониторинга в районах расположения стационарных источников.

Диоксид азота — одна из газовых составляющих атмосферы Земли, присутствующая как в тропосфере, так и в стратосфере. Газ токсичен, он попадает в атмосферу в результате сжигания топлива и биомассы, а также природных процессов, таких как лесные пожары, молнии, почвенные процессы и т. п. В современных мегаполисах основные источники загрязнения диоксидом азота — это автотранспорт и предприятия энергетики [3]. В процессе высокотемпературного сгорания органического топлива происходят реакции двух типов: между кислородом воздуха и азотом в топливе (содержание азота в угле составляет около 1 %, в нефти и природном газе — порядка 0.2–0.3 %) и между кислородом и азотом, содержащимися в воздухе. При этом в атмосферный воздух поступает оксид азота NO, который в присутствии кислорода и озона трансформируется в диоксид азота NO₂ по схеме $\text{NO} + \text{O}_3 = \text{NO}_2 + \text{O}_2$ [4].

1. Основные возможности ЦКП “ИКИ-Мониторинг” в работе с данными по малым газовым составляющим

С 2019 г. в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) в рамках развития информационных систем, функционирующих на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) “ИКИ-Мониторинг” (<http://ckp.geosmis.ru>) [5], осуществляется сбор данных различных спутниковых систем, предоставляющих измерения загрязнения воздуха в разных слоях атмосферы. Получение и архивация данных реализована в полностью автоматическом режиме. Для мониторинга состояния воздуха в информационной системе Vega-Science (<http://sci-vega.ru>, семейство Созвездие-Vega) [6], действующей на базе ЦКП “ИКИ-Мониторинг”, предоставляется доступ к информационным продуктам концентрации газовых веществ по данным спутника Sentinel-5P (прибор TROPOMI). В архивах ЦКП данные прибора доступны с 2018 г. (начало миссии) по настоящее время, они содержат информацию о концентрации в атмосфере таких малых газовых составляющих, как: диоксид серы, диоксид азота, озон, метан, угарный газ, а также продукт аэрозольного индекса. Для анализа динамики состояния атмосферы используются композитные изображения максимальной, минимальной и средней концентраций по каждой газовой составляющей за день, неделю, месяц, год и многолетний период [7].

В Институте космических исследований разработана технология объектного мониторинга, инструменты которой доступны в информационной системе Vega-Science. Технология позволяет автоматически рассчитывать интегральные характеристики (среднее, минимальное, максимальное значения и др.) в границах произвольных полигонов исследуемых объектов на основе различных тематических продуктов/канальных данных, имеющихся в архивах ЦКП “ИКИ-Мониторинг” [8]. Технология дает возможность проводить не только единоразовые расчеты, но и осуществлять постоянный мониторинг таких объектов, автоматически проводя расчеты по новым данным, появляющимся в архивах, а также постоянное слежение за стационарными источниками выбросов NO₂ на основе композитных изображений, создаваемых по данным TROPOMI (Sentinel-5P). С помощью инструментов технологии объектного мониторинга и на основе создаваемых композитных изображений были рассчитаны средние значения концентрации NO₂ в атмосфере над территориями городов-миллионников России (<https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>), где имеются крупные источники выбросов диоксида азота, по ежемесячным композитным изображениям TROPOMI (Sentinel-5P), находящимся в архивах ЦКП “ИКИ-Мониторинг”, с целью оценить сезонные тренды и выявить межгодовую динамику.

2. Основные проблемы организации анализа и интерпретации результатов

Исследовалась взаимосвязь спутниковых и наземных измерений, чтобы понять, насколько концентрации диоксида азота в приземном слое атмосферы, получаемые на основе данных TROPOMI, соответствуют реальным. Независимая оценка проводилась с использованием информации, получаемой на основе данных TROPOMI и наземных данных автоматических измерительных станций “Мосэкомониторинга” (<https://mosecom.mos.ru>). Наземные и спутниковые данные содержат информацию о различных типах концентрации в разных единицах измерения: концентрация в приземном слое в мг/м^3 и в столбе тропосферы — в мкмоль/м^2 . Приведение значений к единому показателю в настоящем исследовании не проводилось, а сравнение осуществлялось путем наложения рядов значений концентраций, полученных разными способами, на один график и построением диаграмм рассеяния. Ежедневные, еженедельные и ежемесячные данные TROPOMI, усредненные в границах Москвы, сравнивались с усредненными данными измерительных станций, расположенных в разных районах Москвы: вблизи автомагистралей, жилых районов и природных зон. В расчет брались дни, когда проводились измерения хотя бы по 20 из 53 станций, данные усреднялись по неделям, если были хотя бы 4 дня с измерениями, по месяцам — более 15 дней с измерениями. Данные, усредненные за разный временной период (день, неделя, месяц), сравнивались с апреля 2018 г. по ноябрь 2021 г. Анализ показал, что корреляция между спутниковыми и наземными измерениями присутствует, наибольшая корреляция наблюдается для ежемесячных данных, поэтому целесообразно анализировать спутниковые данные, усредненные по месяцам и сезонам.

Был проведен анализ изменчивости концентрации NO_2 в зависимости от дня недели на примере летних данных (июнь – август), результаты приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что как для спутниковых, так и для наземных данных наблюдается тренд снижения концентрации в выходные дни, в особенности в воскресенье, в будни она меняется незначительно. Эти результаты отражают реальную картину для Москвы, где основным источником выбросов NO_2 является автотранспорт, что также подтверждено исследованиями (https://yandex.ru/company/researches/2014/ya_traffic_msk_2014).

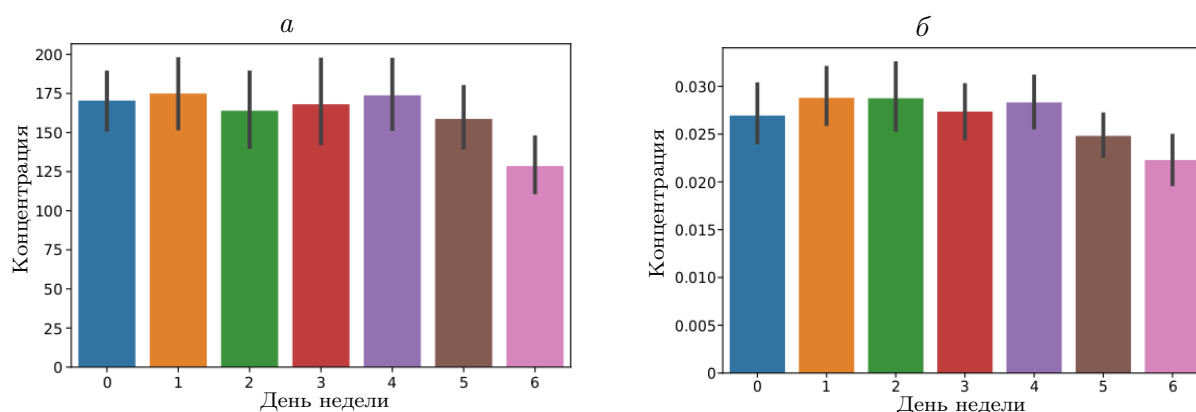


Рис. 1. Зависимость концентрации NO_2 от дня недели в летние месяцы (Москва): а — по прибору TROPOMI; б — по наземным станциям

Fig. 1. NO_2 concentration versus the weekday in the summer months (Moscow): а — by TROPOMI; б — by ground stations

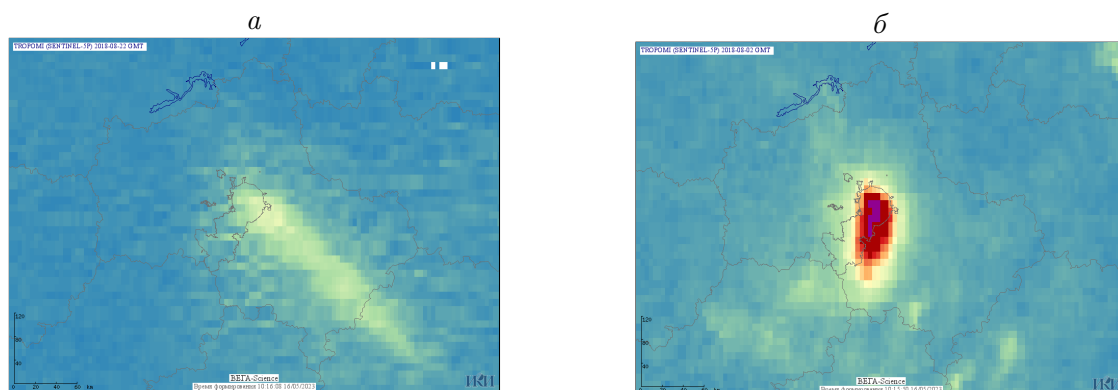


Рис. 2. Выбросы NO_2 в атмосферу Москвы в дни с разной скоростью ветра: *a* — 4.42 м/с (22 августа 2018 г.); *б* — 0.78 м/с (2 августа 2018 г.)

Fig. 2. NO_2 emissions in Moscow atmosphere on days with different wind speeds: *a* — 4.42 m/s (August 22, 2018); *б* — 0.78 m/s (August 2, 2018)

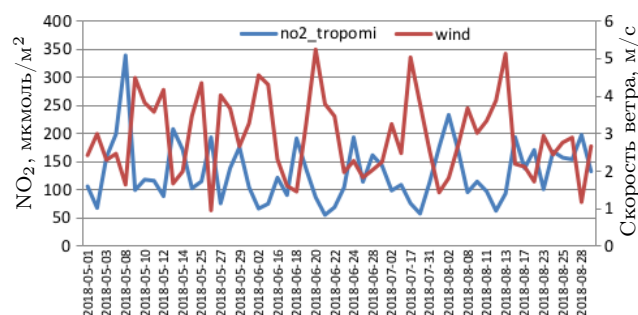


Рис. 3. Сравнительный анализ концентрации NO_2 в атмосфере над территорией Москвы по TROPOMI и скорости ветра

Fig. 3. Comparative analysis of NO_2 concentration in atmosphere over the territory of Moscow using TROPOMI and wind speed

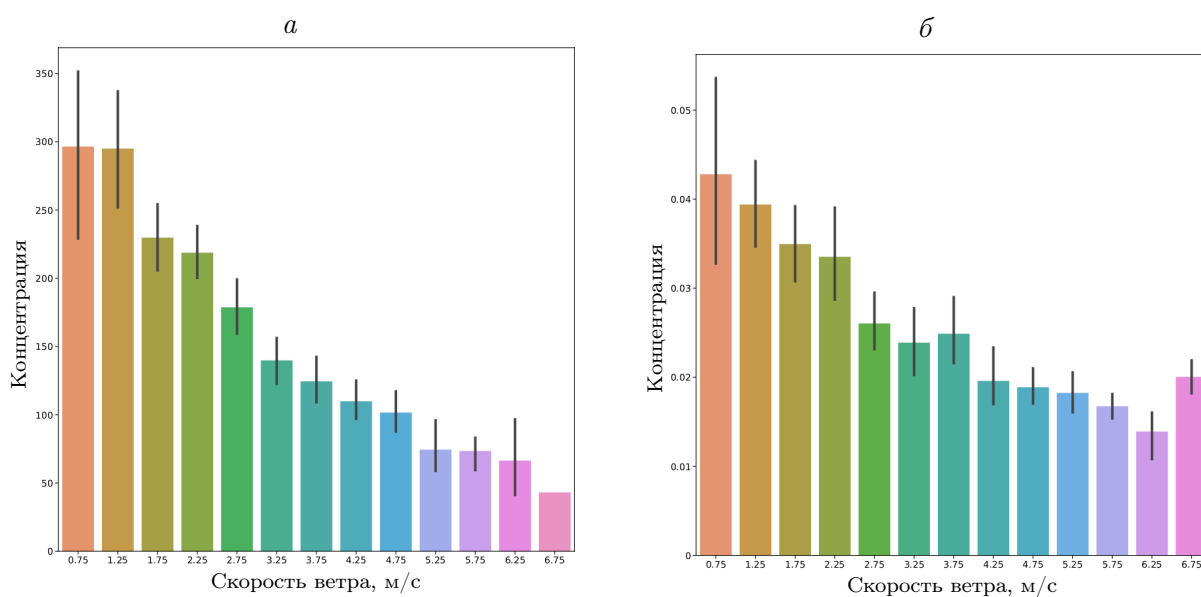


Рис. 4. Зависимость концентрации NO_2 от скорости ветра с шагом 0.5 м/с (Москва): *a* — по прибору TROPOMI; *б* — по наземным данным

Fig. 4. NO_2 concentration versus wind speed using 0.5 m/s step (Moscow): *a* — by TROPOMI; *б* — by ground data

Информация о наземной концентрации бралась в часы, соответствующие времени пролета спутника (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5/satellite-description/orbit>).

Диоксид азота — газ, распространяющийся на десятки километров от источника по направлению ветра, и его концентрация над источником сильно зависит от метеорологических условий и особенностей рельефа. Неблагоприятные метеорологические условия, способствующие накоплению загрязняющих веществ в атмосфере: отсутствие ветра, туманы, инверсия температуры. На рис. 2 представлены выбросы NO_2 в атмосферу над территорией Москвы, наблюдаемые в дни с разной скоростью ветра: 22 августа 2018 г. (скорость ветра составила 4.42 м/с) и 2 августа 2018 г. (0.78 м/с). Информация о скорости ветра получена из данных реанализа NCEP/NCAR [9]. На рис. 3 приведено сравнение рядов концентрации NO_2 и скорости ветра с мая по август 2018 г. Хорошо видно, что при небольших значениях скорости ветра растет концентрация и наоборот. Для локализации источников выбросов предложено создать композитное изображение с концентрацией NO_2 только в синоптически устойчивые дни (на первом этапе выбирались только “безветренные” дни, когда выбросы от источников не уносятся на большие расстояния, а остаются над ними). Чтобы определить понятие “безветренного” дня, по спутниковым и наземным данным были построены зависимости концентрации NO_2 от скорости ветра, представленные на рис. 4.

Для создания композитного изображения в качестве “безветренных” дней взяты дни, когда скорость ветра не превышала 1.5 м/с, а в качестве периода осреднения данных в годовом разрезе выбран период с мая по сентябрь, когда наблюдается наибольшее покрытие данными. Значения за летний период нужны для получения репрезентативных данных для всей территории России, так как определение концентрации диоксида азота основано на измерении поглощения солнечного излучения. Соответственно, корректные измерения содержания газа для всех регионов, включая арктические, возможны только в летний период [4]. При этом за один сезон “безветренных” дней и, как следствие, измерений оказалось незначительное количество, поэтому на сезонных композитных изображениях помимо постоянных источников выделялись лесные пожары, представ-

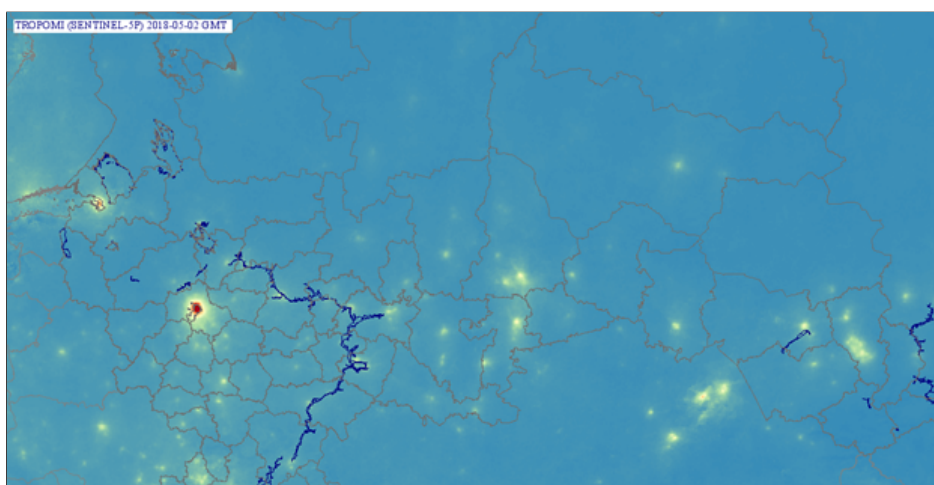


Рис. 5. Многолетнее “безветренное” композитное изображение со средней концентрацией NO_2 по TROPOMI за 2018–2023 гг. (период осреднения май – сентябрь)

Fig. 5. Long-term “windless” composite image with an average concentration of NO_2 according to TROPOMI for 2018–2023 (averaging period May – September)

ляющие собой природные источники выбросов NO_2 . Для исключения таких шумов, как пожары, за весь период миссии Sentinel-5P (TROPOMI) с 2018 по 2023 г. создано единое композитное изображение, представленное на рис. 5.

3. Выделение на изображениях стационарных источников выбросов диоксида азота

В настоящем исследовании выделялись источники выбросов NO_2 , а также устанавливались их границы для расчета статистических показателей. Для выделения непосредственно самих источников на полученном изображении применялся пороговый подход, при котором определялись кластеры пикселей, в которых значение превышало выбранный порог. Первоначальные попытки поиска единого порога для определения границ источников приводили к выделению в некоторых случаях слишком больших районов, где могло находиться несколько источников загрязнений. Поэтому было решено использовать итерационно несколько пороговых значений и построить классифицированную карту источников разной интенсивности. На первом шаге выделялись наиболее крупные источники с высоким порогом, для каждого следующего более низкого порога выделенные на предыдущем шаге области исключались, что позволило решить проблему объединения источников.

В результате анализа выделенных областей выявлены источники выбросов NO_2 , которые легко подразделяются на несколько типов (табл. 1):

- города-миллионники и крупные города, где основными источниками выбросов являются автотранспорт и теплоэнергетика;
- города с предприятиями металлургической и нефтехимической промышленности;
- угольные разрезы;
- города и рабочие поселки при ГРЭС и цементных заводах.

Т а б л и ц а 1. Классификация выделенных источников выбросов NO_2

Table 1. Classification of selected emission sources NO_2

Город-миллионник	Промышленный город	ГРЭС	Угольный разрез	Цементный завод
Москва	Липецк	Рефтинская	Талдинский	Михайловцемент
Санкт-Петербург	Тольятти	Новочеркасская	Киселевский	Серебрянский
Краснодар	Нижнекамск	Беловская	Бачатский	Вольский
Ростов-на-Дону	Магнитогорск	Костромская	Евтинский	Мальцовский
Нижний Новгород	Новокузнецк	Невинномысская	Коркинский	Мордовцемент
Челябинск	Кемерово	Сургутская	—	—
Екатеринбург	Ангарск	Конаковская	—	—
Омск	Губкин	Новомосковская	—	—
Новосибирск	Ачинск	Заинская	—	—
Воронеж	Рязань	Южноуральская	—	—
Казань	Набережные Челны	Ставропольская	—	—
Самара	Тюмень	Рязанская	—	—
Уфа	Барнаул	Киришская	—	—
Красноярск	Череповец	Кармановская	—	—
Волгоград	Ярославль	Ириклинская	—	—
Пермь	Саратов	—	—	—

4. Примеры анализа данных по городам-миллионникам России

Для сравнения статистических показателей выбросов NO_2 по городам-миллионникам их границы были выделены единым порогом на многолетнем “безветренном” композитном изображении. За порог принято максимальное значение, по которому в карту источников попали все города-миллионники, оно составило 60 мкмоль/м^2 . С помощью технологии объектного мониторинга для выделенных границ были получены средние концентрации NO_2 по ежемесячным композитным изображениям. В анализе учитывались месяцы с апреля по октябрь, для которых наблюдалось более 20 дней с измерениями. На рис. 6 представлены сезонные тренды концентраций NO_2 для нескольких исследуемых городов. Как видно из графиков, тренды имеют стабильный характер и практически не меняются из года в год. При этом в летние месяцы наблюдаются низкие значения концентрации, предположительно связанные с периодом отпусков и, как следствие, с уменьшением количества машин в крупных городах. Преимущественно это заметно в июле для мегаполисов Москвы и Санкт-Петербурга, где большая часть выбросов приходится на автотранспорт (исключение представляет июль 2021 г.). В более холодные месяцы значения концентрации выше, что может быть связано с несколькими факторами: с отопительным периодом и, как следствие, увеличением выбросов от ТЭС, наличием температурной инверсии в холодное время, увеличением времени жизни NO_2 [10], а также возможными ошибками восстановления значения концентрации. В атмосфере Москвы и Санкт-Петербурга наблюдается тренд снижения концентрации в апреле 2020 г., когда были введены ограничительные меры во время распространения COVID-19, по сравнению со значениями, зафиксированными в предыдущие годы.

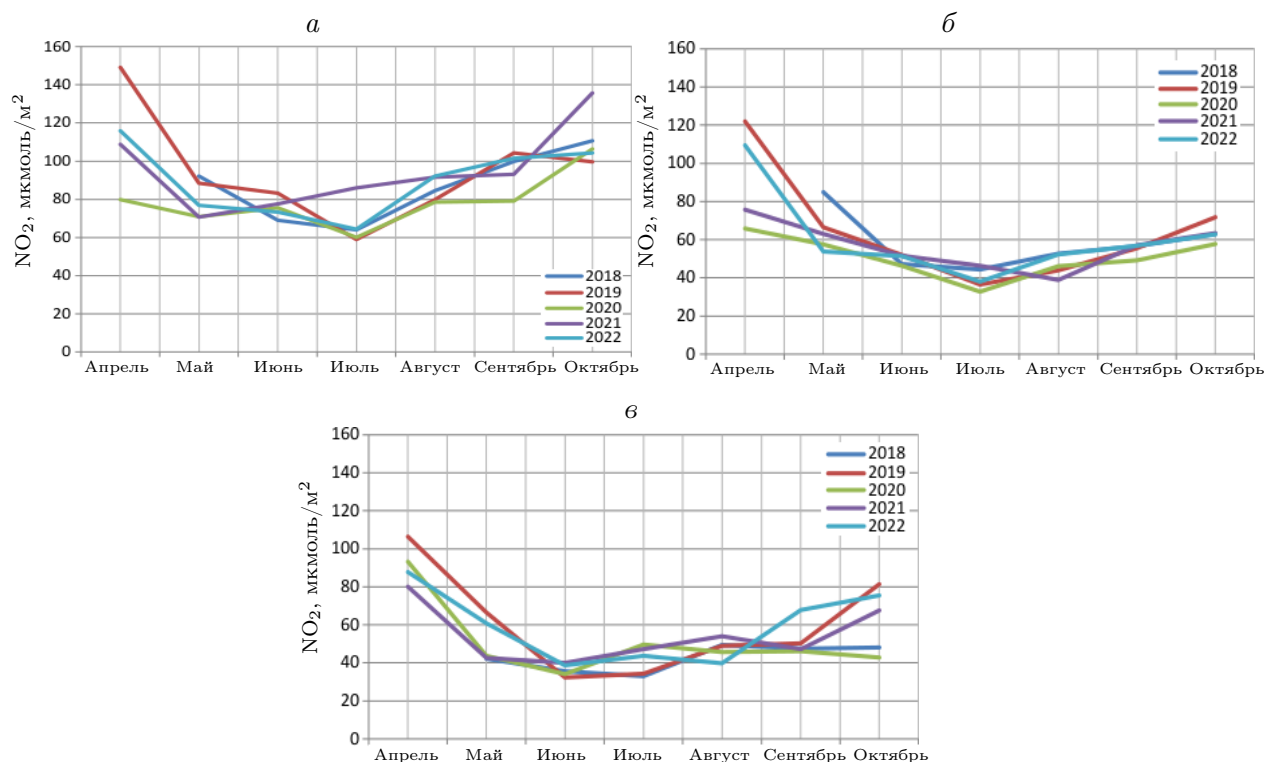


Рис. 6. Средняя месячная концентрация NO_2 для Москвы (а), Санкт-Петербурга (б) и Новосибирска (в) по TROPOMI, мкмоль/м^2

Fig. 6. Average monthly concentration of NO_2 for Moscow (a), Saints Peterburg (б), and Novosibirsk (в) according to TROPOMI, micromol/м^2

Для других городов подобные тренды не были обнаружены, так как инфраструктура и промышленность этих городов продолжали работать.

В табл. 2 представлена средняя многолетняя концентрация NO_2 для исследуемых городов, отсортированная по убыванию значений. Наиболее высокими концентрациями выделяются мегаполисы Москва и Санкт-Петербург, где сосредоточено большое количество населения, а следовательно и транспорта.

На рис. 7 приведена зависимость удельной концентрации NO_2 (средняя многолетняя концентрация, деленная на численность населения города) от количества жителей. Полученные данные можно аппроксимировать степенной функцией $y = 0.3101x^{-0.656}$. При предположении, что основной источник выбросов NO_2 в мегаполисе — автотранспорт, эта зависимость показывает, что процент владения автомобилями обратно пропорционален количеству жителей. Это косвенно свидетельствует о том, что чем крупнее ме-

Т а б л и ц а 2. Средняя многолетняя концентрация NO_2 для городов-миллионников по TROPOMI за 2018–2022 г. (период осреднения апрель – октябрь)

Table 2. Average long-term concentration of NO_2 for cities with a population of one million according to TROPOMI for 2018–2022 (averaging period April – October)

Город	Концентрация C , $\mu\text{моль}/\text{м}^2$	Население P , чел.	C/P , $\mu\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{чел.})$
Москва	89.67	12 645 258	0.071
Санкт-Петербург	59.04	5 380 923	0.110
Новосибирск	52.09	1 620 746	0.321
Челябинск	42.84	1 183 624	0.362
Краснодар	40.35	1 226 226	0.329
Нижний Новгород	39.13	1 239 102	0.316
Ростов-на-Дону	38.48	1 136 199	0.339
Красноярск	38.01	1 097 937	0.346
Екатеринбург	37.68	1 494 333	0.252
Волгоград	37.27	1 002 973	0.372
Воронеж	37.09	1 049 670	0.353
Самара	37.04	1 140 734	0.325
Казань	36.26	1 258 257	0.288
Пермь	36.24	1 045 981	0.346
Омск	34.07	1 133 045	0.301
Уфа	33.74	1 130 497	0.298

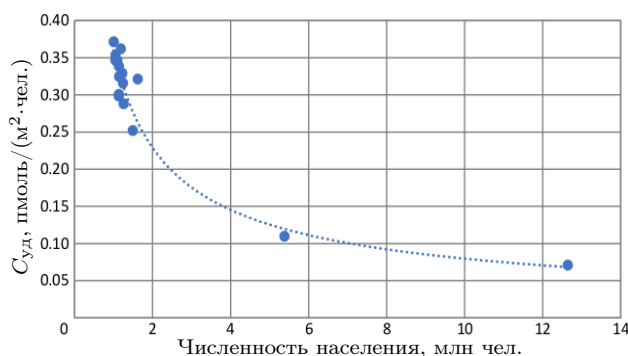


Рис. 7. Зависимость удельной концентрации NO_2 от численности населения города

Fig. 7. Dependence of specific NO_2 concentration on city population size

гаполис, тем больше людей предпочитают общественный транспорт личным автомобилям, что, возможно, также связано с комфортом общественного транспорта. В рейтинге городов России по качеству общественного транспорта (<https://publictransport.simetragroup.ru/rating>) первые места преимущественно занимают города-миллионники с метрополитеном, на который приходится часть нагрузки по перевозке пассажиров.

Заключение

В архивах ЦКП “ИКИ-Мониторинг” доступны данные о концентрации основных газов в различных слоях атмосферы, полученные с использованием прибора TROPOMI (Sentinel-5P), имеется возможность работы с временными композитами разной скважности по газовым составляющим. Использование “безветренных” данных и итерационного порогового метода позволило локализовать источники выбросов NO₂, классифицировать их и оценить интенсивность. В информационной системе Vega-Science доступны инструменты для постоянного наблюдения за объектами, с помощью которых в автоматическом режиме стало возможно осуществлять мониторинг источников выбросов различных газов на основе имеющихся композитных изображений о концентрации газов, в частности NO₂. Полученные данные позволили оценить межгодовую динамику, выявить сезонные тренды на примере городов-миллионников России. В качестве ближайших направлений совершенствования методов анализа могут выступить: учет моделей диффузии и распада газа, учет других метеоусловий (не только отсутствия ветра), рельефа местности, уточнение границ влияния источников для оценки мощностей их выбросов.

Благодарности. Работа выполнена с использованием возможностей ЦКП “ИКИ-Мониторинг”, развиваемого и поддерживаемого в рамках темы “Мониторинг” Минобрнауки (госрегистрация № 122042500031-8) и при поддержке темы “Эмиссия” (госрегистрация № 122101700045-7).

Список литературы

- [1] United Nations Environment Programme (2023). Guide on ambient air quality legislation — air pollution series. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/42536>.
- [2] Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2021, TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products. Version 02. European Space Agency. DOI:10.5270/S5P-9bnp8q8.
- [3] **Силаева П.Ю., Силаев А.В.** Особенности рассеивания выбросов диоксида азота предприятиями энергокомплекса и их влияние на население мегаполисов. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018; 26(1):63–72. DOI:10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72.
- [4] **Тронин А.А., Крицук С.Г., Киселев А.В.** Многолетние тренды содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019; 16(2):259–265. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265.
- [5] **Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А.** 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; 16(3):151–170. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- [6] Loupian E.A., Burtsev M.A., Proshin A.A., Kashnitskii A.V. Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system. Remote Sensing. 2022; 14(1):Art. 77. DOI:10.3390/rs14010077. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/1/77>.
- [7] Брилль 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; 20(5):85–95. DOI:10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
- [8] Константинова А.М., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Мухамеджанов И.Д. Унифицированная технология дистанционного мониторинга природных и антропогенных объектов. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021; 18(4):41–52. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.
- [9] National centers for environmental prediction/national weather service/NOAA/U.S. Department of commerce. 2015, updated daily. NCEP GDAS/FNL 0.25 degree global tropospheric analyses and forecast grids. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. DOI:10.5065/D65Q4T4Z.
- [10] Beirle S., Boersma K., Platt U., Lawrence M., Wagner T. Megacity emissions and lifetimes of nitrogen oxides probed from space. Science. 2011; 333(6050):1737–1739. DOI:10.1126/science.1207824.

Abilities of object monitoring technology for analyzing nitrogen dioxide concentrations in areas where major sources of pollution are located

A. M. KONSTANTINOVA^{1,*}, A. A. BRIL¹, E. A. LOUPIAN¹, A. V. KASHNITSKII¹,
V. P. SAVORSKIY^{1,2}

¹Space Research Institute RAS, 117997, Moscow, Russia

²Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, 141190, Fryazino, Russia

*Corresponding author: Anna M. Konstantinova, e-mail: konstantinova@d902.iki.rssi.ru

Received December 07, 2023, accepted February 21, 2024.

Abstract

The research demonstrates the main abilities of using CCU “IKI-Monitoring” and object-based monitoring technology to analyze the state of the environment in areas where large industrial facilities producing emissions, for example, nitrogen dioxide, are located. A brief description of the composite images with the concentration of small gas components based on data from the Sentinel-5P satellite (TROPOMI device) is given. A comparison of satellite data with the concentration of nitrogen dioxide in the troposphere together with information obtained by ground-based measurements in the surface layer for Moscow is provided. Major problems of analysis and interpretation of available data related to the need to analyze meteorological information together with satellite

data are identified. A technology for creating a windless composite image to localize the sources of nitrogen dioxide emissions is described. An iterative threshold method for identifying stationary sources of nitrogen dioxide emissions on the territory of Russia is proposed along with the estimation of their intensity. Some results of data processing on the concentration of nitrogen dioxide in the atmosphere over million-plus cities in Russia, which are one of the most powerful sources of emissions of this gas, are given.

Keywords: satellite monitoring, small gas components, nitrogen dioxide, TROPOMI, CCU “IKI-Monitoring”.

Citation: Konstantinova A.M., Bril A.A., Loupian E.A., Kashnitskii A.V., Savorskiy V.P. Abilities of object monitoring technology for analyzing nitrogen dioxide concentrations in areas where major sources of pollution are located. *Computational Technologies*. 2024; 29(3):92–102. DOI:10.25743/ICT.2024.29.3.008. (In Russ.)

Acknowledgements. The work was carried out using the capabilities of CCU “IKI-Monitoring”, and supported within the framework of the topic “Monitoring” of the Ministry of Education and Science (state registration No. 122042500031-8) and with the support of the topic “Emission” (state registration No. 122101700045-7).

References

1. United Nations Environment Programme (2023). Guide on ambient air quality legislation — air pollution series. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/42536>.
2. Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2021, TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products. Version 02. European Space Agency. DOI:10.5270/S5P-9bnp8q8.
3. Silaeva P.Yu., Silaev A.V. Peculiarities of dispersion of nitrogen dioxide emissions by the energy complex enterprises and their impact on the population of megapolises. *Vestnik Rossiyskogo Universiteta Druzhby Narodov. Seriya: Ekologiya i Bezopasnost' Zhiznedeyatel'nosti*. 2018; 26(1):63–72. DOI:10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72. (In Russ.)
4. Tronin A.A., Kritsuk S.G., Kiselev A.V. Estimation of multiyear changes in nitrogen oxide concentrations over Russia from satellite measurements. *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2019; 16(2):259–265. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265. (In Russ.)
5. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data. *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2019; 16(3):151–170. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170. (In Russ.)
6. Loupian E.A., Burtsev M.A., Proshin A.A., Kashnitskii A.V. Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system. *Remote Sensing*. 2022; 14(1):Art. 77. DOI:10.3390/rs14010077. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/1/77>.
7. 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 Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2023; 20(5):85–95. DOI:10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95. (In Russ.)
8. Konstantinova A.M., Balashov I.V., Kashnitskii A.V., Loupian E.A., Mukhamedzhonov I.D. Unified technology for remote monitoring of natural and anthropogenic objects. *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2021; 18(4):41–52. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52. (In Russ.)
9. National centers for environmental prediction/national weather service/NOAA/U.S. Department of commerce. 2015, updated daily. NCEP GDAS/FNL 0.25 degree global tropospheric analyses and forecast grids. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. DOI:10.5065/D65Q4T4Z.
10. Beirle S., Boersma K., Platt U., Lawrence M., Wagner T. Megacity emissions and lifetimes of nitrogen oxides probed from space. *Science*. 2011; 333(6050):1737–1739. DOI:10.1126/science.1207824.