



УДК 572.022+504.75.05(597)
DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-2-350-362
EDN QQBGN Y

Пространственно-временная динамика концентраций диоксида азота в атмосфере Северо-Восточного Вьетнама

Нгуен Ч.Х., Куролап С.А., Нестеров Ю.А.

Воронежский государственный университет
Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1
hieugeo@mail.ru, skurolap@mail.ru, nland58@mail.ru

Аннотация. Цель исследования – анализ пространственно-временной динамики концентрации диоксида азота (NO_2) в атмосфере северо-восточного Вьетнама в период с 2019 по 2024 год. Исследование сосредоточено на выявлении закономерностей загрязнения воздуха на данной территории, а также на выявлении источников загрязнения для разработки предложений по управлению качеством воздуха и повышению устойчивости к экологическим рискам. Для анализа использовались данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационные технологии (ГИС). Методология включала обработку данных о концентрации NO_2 в среде Google Earth Engine, что позволило выделить основные тренды и периодические колебания концентрации загрязнителя. В среде QGIS была создана серия карт для пространственно-временного анализа динамики изменения концентраций диоксида азота. Результаты исследования показали, что концентрация NO_2 в атмосфере была наиболее высокой в районах, расположенных на пересечении провинций Куангнинь, Хайфон и Хайзыонг, а также Бакнина и Бакжанга. Эти регионы являются центрами экономической и промышленной активности, где наблюдается интенсивный транспорт и высокая концентрация крупных промышленных предприятий. Наблюдаемое резкое уменьшение уровня диоксида азота в течение 2020 года тесно коррелирует со временем глобального кризиса, вызванного пандемией COVID-19. Именно в этот момент многие страны, включая Вьетнам, приняли меры по ограничению производственных процессов и регулированию автомобильного движения. Анализ собранных материалов позволяет предположить наличие прямой зависимости между содержанием NO_2 в воздушных массах северо-восточного региона Вьетнама и степенью развитости промышленной инфраструктуры, а также плотностью транспортных потоков в отдельных зонах. Данное научное исследование подчеркивает необходимость создания совместных механизмов взаимодействия между административными единицами для осуществления эффективного наблюдения за состоянием атмосферы, внедрения систем управления чистотой воздуха и разработки стратегий по снижению антропогенного воздействия.

Ключевые слова: Северо-Восточный Вьетнам, Google Earth Engine, Sentinel-5P TROPOMI, диоксид азота, пространственно-временной анализ

Для цитирования: Нгуен Ч.Х., Куролап С.А., Нестеров Ю.А. 2025. Пространственно-временная динамика концентраций диоксида азота в атмосфере Северо-Восточного Вьетнама. Региональные геосистемы, 49(2): 350–362. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-2-350-362 EDN: QQBGN Y

Spatiotemporal Dynamics of Atmospheric Nitrogen Dioxide Concentrations over Northeastern Vietnam

Trung H. Nguyen, Semyon A. Kurolap, Yuriy A. Nesterov

Voronezh State University
1 Universitetskaya Sq, Voronezh 394018, Russia
hieugeo@mail.ru, skurolap@mail.ru, nland58@mail.ru

Abstract. The aim of the study is to analyze the spatiotemporal dynamics of nitrogen dioxide (NO_2) concentration in the atmosphere of Northeast Vietnam from 2019 to 2024. The study focuses on

© Нгуен Ч.Х., Куролап С.А., Нестеров Ю.А., 2025

identifying patterns of air pollution in this area and determining pollution sources to develop recommendations for air quality management and improving resilience to environmental risks. For the analysis, remote sensing (RS) data and geographic information system (GIS) technologies were used. The methodology involved processing NO₂ concentration data in the Google Earth Engine environment, which allowed the identification of major trends and periodic fluctuations in pollutant concentration. A series of maps was created using QGIS for the spatiotemporal analysis of NO₂ concentration dynamics. The results of the study showed that the NO₂ concentration in the atmosphere was highest in areas located at the intersections of the provinces of Quảng Ninh, Hải Phòng, Hải Dương, and Bắc Ninh, Bắc Giang. These regions are centers of economic and industrial activity, characterized by intensive transportation and a high concentration of large industrial enterprises. The observed sharp decrease in nitrogen dioxide levels during 2020 closely correlates with the period of the global crisis caused by the COVID-19 pandemic. At that time, many countries, including Vietnam, implemented measures to restrict industrial processes and regulate vehicular traffic. The analysis of the collected data suggests a direct relationship between NO₂ concentrations in the air masses of northeastern Vietnam and the degree of industrial infrastructure development, as well as the density of traffic flows in specific areas. This scientific investigation highlights the necessity of establishing cooperative mechanisms between administrative units to enable effective atmospheric monitoring, implement air quality management systems, and develop strategies to reduce anthropogenic impacts.

Keywords: Northeast Vietnam, Google Earth Engine, Sentinel-5P TROPOMI, nitrogen dioxide, spatiotemporal analysis

For citation: Nguyen T.H., Kurolap S.A., Nesterov Yu.A. 2025. Spatiotemporal dynamics of atmospheric nitrogen dioxide concentrations over Northeastern Vietnam. *Regional Geosystems*, 49(2): 350–362 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-2-350-362 EDN: QQBGNY

Введение

Загрязнение воздуха является одной из главных экологических проблем современности. По данным Всемирной организации здравоохранения, более 7 миллионов человек ежегодно умирают из-за загрязнения воздуха [Kuehn, 2014]. Среди множества веществ, присутствующих в антропогенных выбросах, особое место занимает оксид азота (NO₂). Это химическое соединение играет ключевую роль в процессах, негативно влияющих как на экосистемы планеты, так и на физиологическое состояние человека. Его наличие в атмосферном воздухе является серьезным фактором, способствующим ухудшению как природных условий, так и уровня общественного здоровья [Рязанцева, Лукашина, 2008]. Мониторинг концентрации NO₂ в атмосфере способствует не только защите общественного здоровья, но и играет важную роль в управлении и снижении выбросов парниковых газов. NO₂ является не только важным индикатором качества воздуха, но и участвует в химических реакциях в атмосфере, приводящих к образованию кислотных дождей, мелкодисперсных частиц (PM_{2.5}) и тропосферного озона [Kaplan et al., 2019]. Эти явления могут вызывать негативные последствия для здоровья населения, такие как рост респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний, а также рака легких [Рязанцева, Лукашина, 2008].

Традиционные наземные методы контроля состояния атмосферы обеспечивают высокую степень точности измерений, но их эффективность ограничена при масштабировании на обширные пространства. С другой стороны, использование космических технологий для анализа качества воздуха началось еще в 1980-х годах, первоначально сосредоточившись на изучении озонового слоя. За прошедшие десятилетия эти системы продемонстрировали значительный прогресс в развитии технологий наблюдения. В частности, в 2017 году был запущен спутник *Sentinel-5 Precursor* с инновационным устройством *Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI)*, предназначенным для детального исследования состава газов в нижних и верхних слоях атмосферы [Kaplan, Avdan, 2020]. Ин-

формация, собранная этим оборудованием, была успешно внедрена в глобальную облачную систему *Google Earth Engine*, что открыло новые возможности для международного мониторинга состояния воздушной среды [Verhoelst et al., 2021]. Благодаря этому соединению современных технологий и данных, последние годы отметились ростом научных работ, посвященных анализу и применению информации от *Sentinel-5P TROPOMI* через платформу *GEE* для решения экологических задач в различных регионах мира [Kaplan et al., 2019; Kaplan, Avdan, 2020; Virghileanu et al., 2020; Kanniah et al., 2021; Liu et al., 2021; Magro et al., 2021; Морозова и др., 2022; Bodah, 2022; Maurya et al., 2022; Van Geffen et al., 2022; Ракитин и др., 2023; Царев, Рыжкова, 2023; Гусев, Флерко, 2024; Shetty et al., 2024].

Однако во Вьетнаме данные *Sentinel-5P TROPOMI* пока не получили широкого применения. На данный момент опубликовано лишь небольшое количество исследований, посвященных оценке концентрации загрязняющих веществ в атмосфере с использованием данных дистанционного зондирования через платформу *GEE*, и эти исследования охватывали лишь короткие временные периоды и ограниченные территории [Thao et al., 2022; Chinh et al., 2023]. Исследования на больших географических масштабах, которые позволили бы получить комплексное пространственно-временное представление, пока не проводились. Целью наших исследований является анализ пространственно-временной динамики концентрации диоксида азота (NO_2) в атмосфере Северо-Восточного Вьетнама за последние 6 лет (2019–2024 год).

Объекты и методы исследований

Географический фокус данного анализа охватывает регион Северо-Восточного Вьетнама, где были учтены следующие провинции: Лангшон, Бакжанг, Бакнинь, Куангнинь, Хайфонг и Хайзыонг (рис. 1).

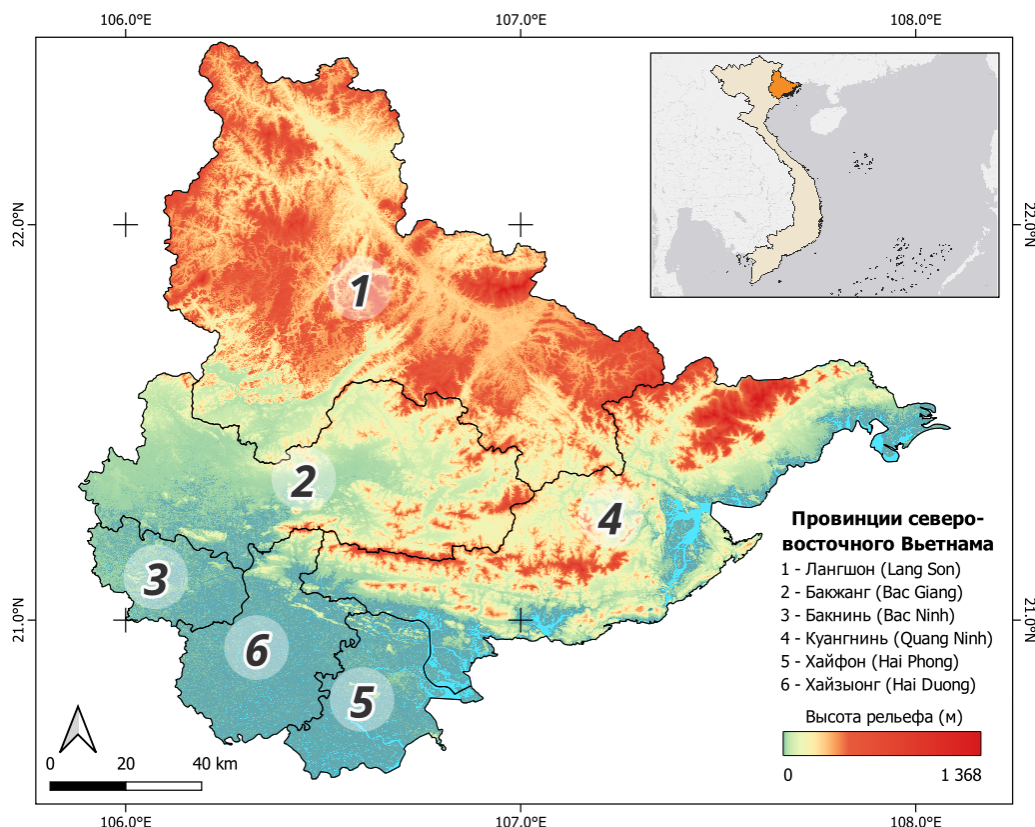


Рис. 1. Карта исследуемой территории Северо-Восточного Вьетнама
Fig. 1. Map of the study area of northeastern Vietnam

Данная территория – один из наиболее динамично развивающихся экономических регионов Северо-Восточного Вьетнама, характеризующийся высокой концентрацией промышленности, быстрыми темпами урбанизации и интенсивным транспортным движением. Провинции Хайфонг и Куангнинь обладают крупными морскими портами и стратегическими промышленными зонами, выполняя роль международных торговых ворот Северного Вьетнама, тогда как Бакнинь и Бакжанг являются центрами производства в области электроники и машиностроения. Кроме того, интенсивное экономическое развитие региона сопровождается значительным экологическим воздействием на качество воздуха. Этот регион также находится под влиянием природных факторов, таких как низменный рельеф и тропический муссонный климат, что увеличивает вероятность накопления загрязняющих веществ в атмосфере.

Данные спутниковых снимков *Sentinel-5P TROPOMI* сначала собираются и обрабатываются с помощью программирования на языке *Javascript* в среде приложения *Google Earth Engine* [Царев, Рыжкова, 2023]. В нашем исследовании данные снимков из пакета *COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2* были агрегированы по месяцам и годам за период с 2019 по 2024 год для выбранного района исследования. Концентрация NO_2 для каждого пикселя агрегированных снимков рассчитывалась как среднее значение всех данных, зарегистрированных в период оценки (месяц или год), что стало основой для анализа тенденций изменения концентрации NO_2 во времени и пространстве. Платформа *Google Earth Engine* также позволяет проводить статистические расчеты, строить графики изменений концентрации NO_2 во времени, выявляя сезонные и годовые изменения, а также оценивать влияние природных и антропогенных факторов.

Помимо данных о NO_2 , в исследовании использовались картографические слои, отображающие зоны концентрации промышленных и социальных активностей, загруженные из *Global Human Settlement Layer (GHSL)*. Эти данные предоставляют важную информацию о распределении населения и урбанизированных территорий [Логвинов, 2022], что стало основой для оценки взаимосвязи между человеческой деятельностью и уровнем загрязнения воздуха. С помощью программного обеспечения *QGIS* была создана серия карт, отражающих пространственно-временные изменения концентрации NO_2 в период с 2019 по 2024 год. Эти карты позволяют получить наглядное представление о пространственно-временной динамике NO_2 , помогают выявлять «горячие точки» с высокой концентрацией NO_2 , а также определять взаимосвязь между концентрацией NO_2 и зонами с высокой плотностью промышленной и социальной активности.

Комплексный подход, объединяющий анализ спутниковых данных, использование облачных вычислительных инструментов и современных геоинформационных систем, позволил создать точную и всестороннюю методологию исследования. Это способствует эффективной оценке распределения и динамики концентрации NO_2 в атмосфере в северо-восточном регионе Вьетнама. Следует отметить, что концентрация NO_2 , зарегистрированная на спутниковых снимках *Sentinel-5P TROPOMI*, изначально выражается в единицах mol/m^2 . Для сравнения с предельно допустимыми значениями, установленными национальным стандартом качества атмосферного воздуха *QCVN 05:2013* (табл. 1), может быть использована следующая формула [Savenets, 2021]:

$$C = \frac{C_{column}}{H} \times M \times A, \quad (1)$$

где: C – концентрация выбросов, пересчитанная в мкг/м^3 ; C_{column} – концентрация выбросов, рассчитанная по данным дистанционного зондирования *Sentinel-5P TROPOMI* в единицах mol/m^2 ; H – высота атмосферного слоя ($H = 10000$ м); M – молекулярная масса газа ($M_{\text{NO}_2} = 46,0055$ г/моль); A – коэффициент пересчета из единиц г/м^3 в мкг/м^3 ($A = 1000000$).



Таблица 1
Table 1

Предельно-допустимая концентрация NO₂ в окружающем воздухе [QCVN..., 2023]
Maximum permissible concentration of NO₂ in ambient air [QCVN..., 2023]

№	Временной интервал	Предельно-допустимая концентрация NO ₂ (мкг/м ³)
1	Среднее за 1 час	200
2	Среднее за 8 часов	не регламентируется
3	Среднее за 24 часа	100
4	Среднее за год	40

Результаты и их обсуждение

Анализ динамики концентрации NO₂ за период 2019–2024 годов предоставил понимание тенденций загрязнения воздуха на территории Северо-Восточного Вьетнама. Динамика месячных показателей содержания NO₂ в атмосфере (рис. 2) отражает выраженную вариабельность значений на протяжении различных временных промежутков. Пиковые значения (максимумы) чаще всего фиксируются в период с октября по февраль, что соответствует зимне-весеннему сезону во Вьетнаме. Данная тенденция может быть связана с особенностями климатических условий данного периода, такими как относительно низкие температурные показатели, повышенное энергопотребление для обогрева жилых и промышленных помещений, а также частые случаи термической инверсии. Эти факторы существенно снижают способность атмосферы к дисперсии загрязняющих веществ, способствуя их аккумуляции, включая диоксид азота.

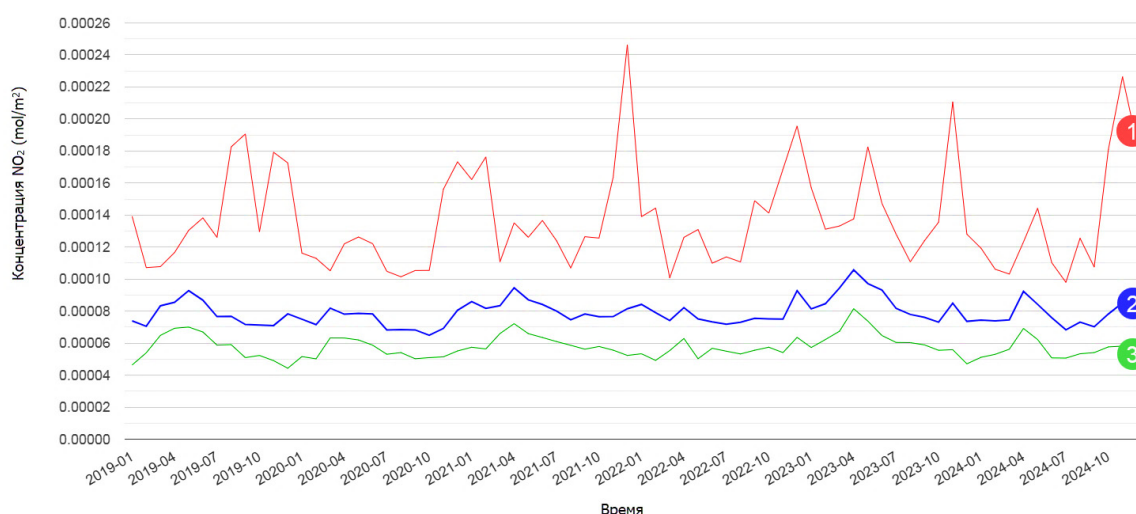


Рис. 2. Изменение концентрации NO₂ по месяцам за период 2019–2024 годов.
На графике: (1) – максимальное значение (max), (2) – среднее значение (mean),
(3) – минимальное значение (min)

Fig. 2. NO₂ concentration changes by month for the period 2019–2024. The graph shows: (1) – maximum value (max), (2) – average value (mean), (3) – minimum value (min)

В целом максимальные значения (*Max*) за период исследования колебались от 0,00010 до 0,00024 моль/м², тогда как средние значения (*Mean*) находились в диапазоне от 0,00006 до 0,00011 моль/м², а минимальные значения (*Min*) – от 0,00004 до 0,00008 моль/м². Это указывает на относительно стабильный уровень фоновое загрязнения в определенные периоды времени. Причем небольшая амплитуда вариаций между значениями *Min* и *Mean* по сравнению с значением *Max* указывает на неравномерное распределение источников выбросов.

Серия карт, показывающих изменения концентрации NO₂ в период с 2019 по 2024 год (рис. 3), демонстрирует пространственно-неоднородное распределение концентрации

NO₂ в атмосфере, с отдельными зонами высокого уровня загрязнения в течение длительного времени. В целом, динамика по годам показывает, что максимальная концентрация NO₂ в воздухе в исследуемом регионе была зафиксирована в 2023 году и составила 0,000118 моль/м² (эквивалентно 0,46 мкг/м³), что ниже предельно допустимой концентрации NO₂ в атмосферном воздухе, согласно национальному стандарту Вьетнама *QCVN 05:2013*. Однако детальный анализ полученных данных выявляет несколько важных аспектов, которые могут служить основой для мониторинга выбросов и разработки экологической политики.

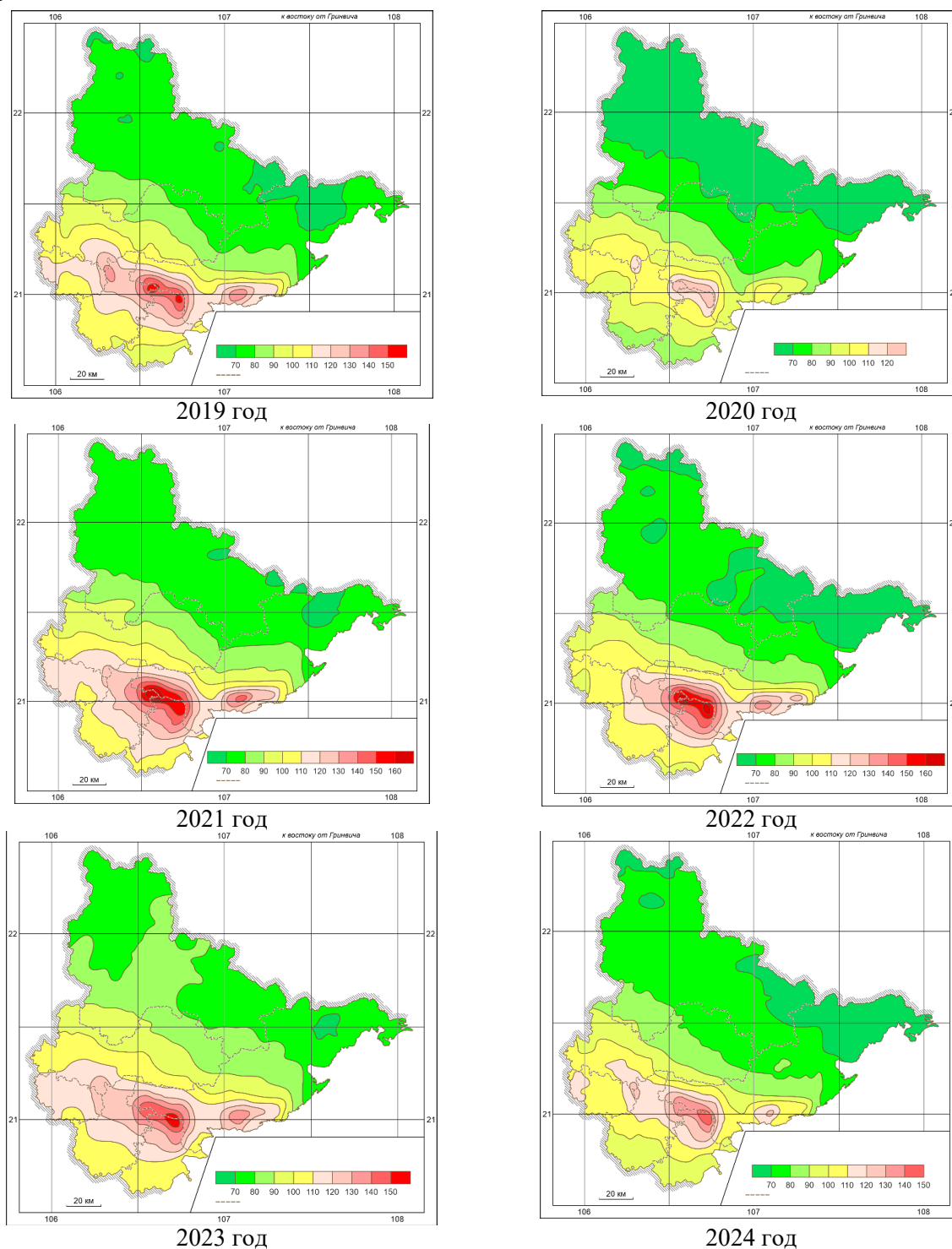


Рис. 3. Пространственно-временные изменения концентрации NO₂ (мкмоль/м³) в исследуемом регионе за 2019–2024 гг.
Fig. 3. Spatiotemporal changes in NO₂ (micromole/m³) concentration in the study region from 2019 to 2024

Одним из примечательных явлений, наблюдаемых на серии карт, является значительное снижение концентрации NO_2 в 2020 году по сравнению с 2019 годом и другими годами, за которым последовал резкий рост в 2021 году, охватывающий весь исследуемый регион. Основной причиной этого снижения, вероятно, стала пандемия *COVID-19*, когда многие страны, включая Вьетнам, ввели строгие меры социального дистанцирования [Behera et al., 2021; Kanniah et al., 2021; Ganbat et al., 2022]. Значительное сокращение экономической активности и транспортного движения в этот период привело к значительному снижению выбросов NO_2 . После ослабления ограничительных мер в 2021 году концентрация NO_2 резко возросла, превысив показатели 2019 года во многих районах. Это можно объяснить быстрым экономическим восстановлением, особенно в промышленных зонах. Многие предприятия увеличили производство, чтобы компенсировать убытки 2020 года, что привело к росту выбросов. Кроме того, восстановление транспортной активности также способствовало значительному увеличению выбросов от транспортных объектов.

При внимательном изучении особенностей размещения зон загрязнения становится очевидным, что концентрация NO_2 тесно сопряжена с численностью жителей, степенью развития промышленности и процессами расширения городских территорий (рис. 4). Южные прибрежные районы провинции Куангнинь, а также перекрестные зоны между провинциями Куангнинь, Хайфон, Хайзыонг, Бакнинь и Бакжанг являются «горячими точками». Эти районы характеризуются высокой плотностью населения, наличием крупных промышленных зон и развитой транспортной инфраструктурой, включая морские порты, автомагистрали и густую сеть дорог.

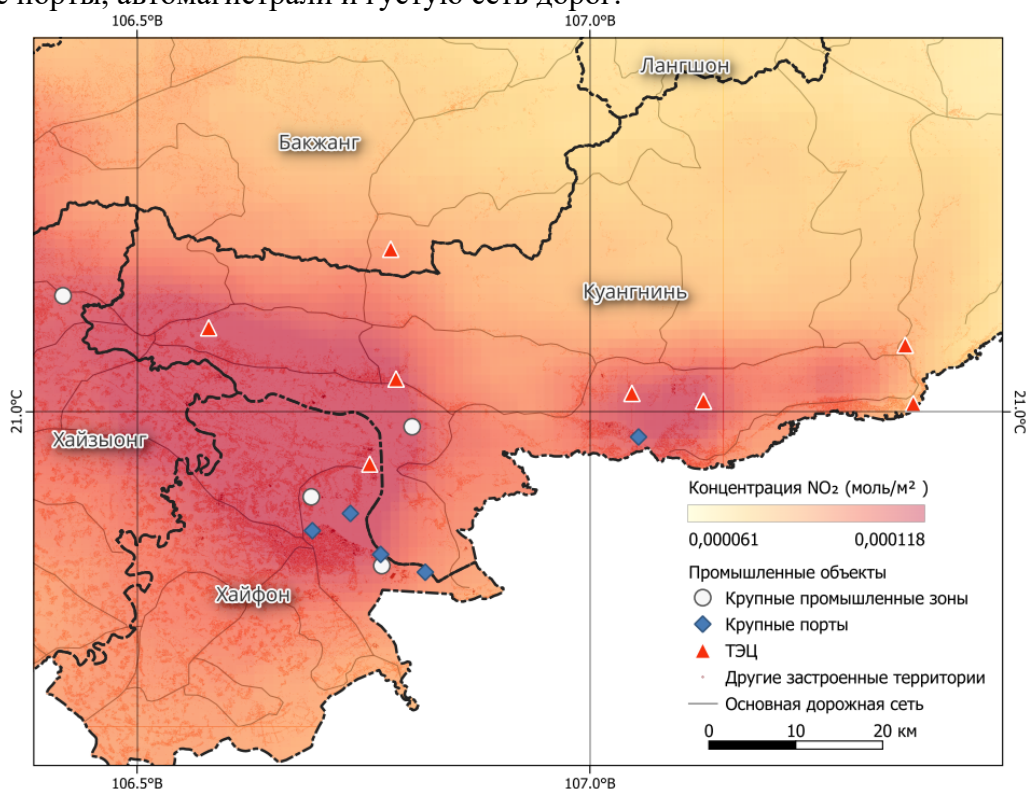


Рис. 4. Районы на юге, охватывающие провинции Хайзыонг, Хайфон и южную часть провинции Куангнинь, отличаются повышенным уровнем развития городов и промышленности, что связано с заметно большими значениями концентрации NO_2 по сравнению с более северными территориями, такими как провинции Лангшон, Бакжанг и северная зона провинции Куангнинь

Fig. 4. The regions in the south of the map, encompassing the provinces of Hải Dương, Hải Phòng, and the southern part of Quảng Ninh province, are characterized by a higher level of urban and industrial development, which is associated with significantly greater NO_2 concentrations compared to the more northern territories, such as the provinces of Lạng Sơn, Bắc Giang, and the northern zone of Quảng Ninh province

Результаты исследования показывают, что районы с высокой концентрацией NO_2 обычно сосредоточены в пограничных зонах между провинциями, такими как районы пересечения провинций Куангнинь, Хайфон, Хайзыонг и между Бакнинь, Бакжанг и Хайзыонг (рис. 5). Это явление заслуживает внимания и может быть объяснено несколькими факторами. С природной точки зрения, территория, где пересекаются провинции Северо-Восточного Вьетнама, обладает достаточно ровным рельефом, без естественных преград, таких как горы или густые леса, которые могли бы препятствовать распространению выбросов. В условиях неблагоприятной погоды (например, при температурной инверсии) выбросы могут накапливаться в этих районах, не имея возможности для значительного рассеивания.

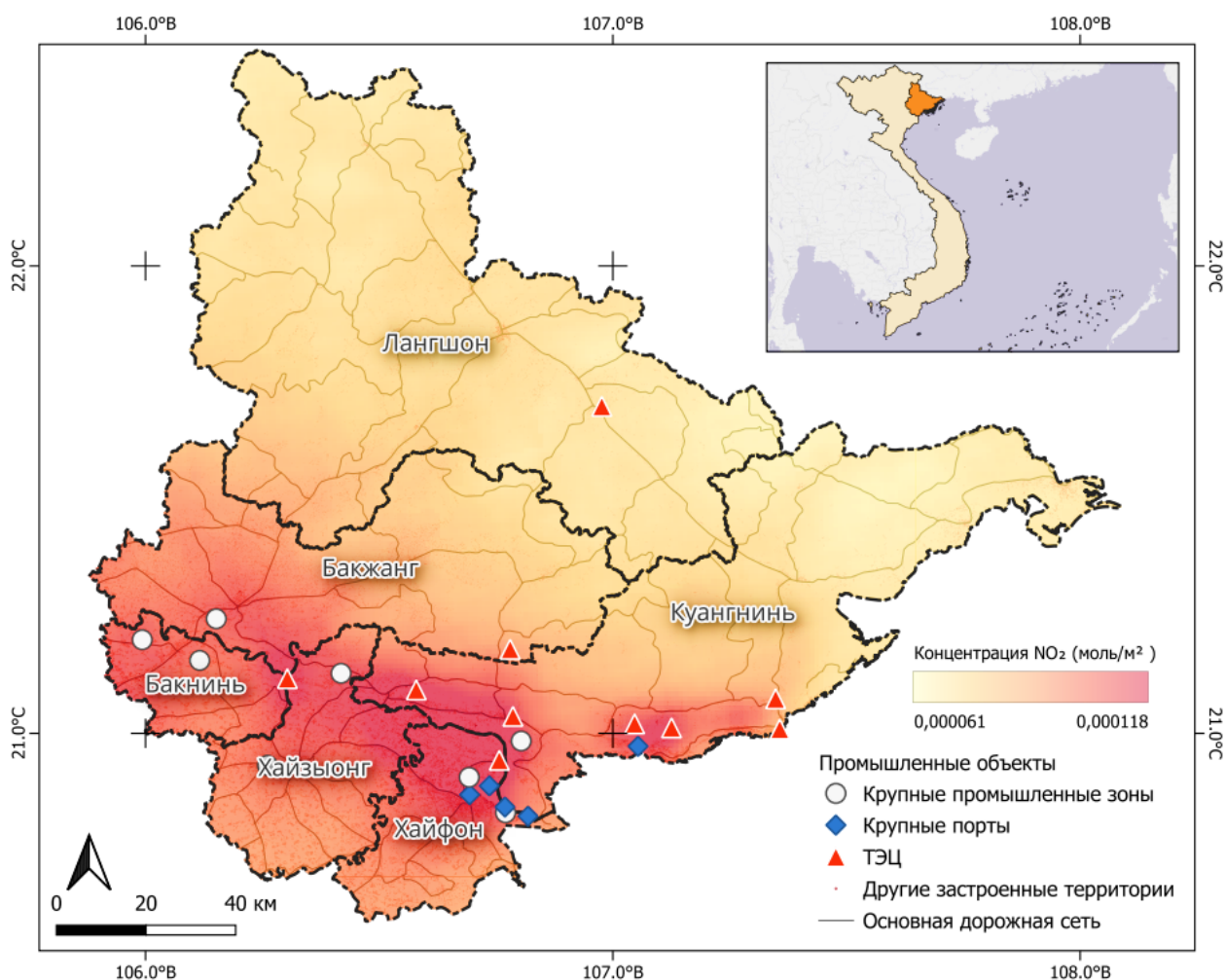


Рис. 5. Концентрация NO_2 выше в южных районах, где сосредоточено множество крупных промышленных зон и высокая плотность населения. Районы, расположенные на стыке провинций Хайзыонг – Хайфон – Куангнинь и Бакнинь – Хайзыонг – Бакжанг, регулярно фиксируют более высокие концентрации NO_2 по сравнению с окружающими территориями

Fig. 5. NO_2 concentration is higher in the southern regions on the map, where many large industrial zones and high population density are concentrated. Areas located at the intersection of the provinces of Hải Dương – Hải Phòng – Quảng Ninh and Bắc Ninh – Hải Dương – Bắc Giang regularly record higher NO_2 concentrations compared to surrounding areas

Кроме того, в этом районе тепловые электростанции и крупные промышленные зоны в основном расположены вдоль западно-восточной транспортной оси от Ханоя до Бакниня – Хайзыонга – Хайфона (где находится крупнейший морской порт на севере Вьетнама). Также следует отметить межпровинциальную специфику и концентрацию



экономической и социальной активности. Районы на стыке провинций часто являются центрами важных экономических объектов и крупной транспортной инфраструктуры, таких как автомагистрали, морские порты или межпровинциальные промышленные зоны. Например, район пересечения Куангнинь, Хайфона и Хайзыонга включает крупные морские порты (порт Хайфон, порт Кай Лан) и ключевые промышленные зоны, такие как промышленная зона Динь Ву, промышленная зона *VSIP* в Хайфоне. Район Бакниня, Бакжанга и Хайзыонга является промышленным треугольником с концентрацией крупных промышленных зон, таких как Куе Во (Бакнин), Ван Чунг (Бакжанг) и Конг Хоа (Хайзыонг). Производственные и грузовые перевозки в этих районах создают значительные выбросы NO_2 от заводов, транспортных средств и вспомогательных промышленных производств. Районы на границе между провинциями часто являются перекрестками или своеобразными центрами концентраций основных транспортных магистралей. Например, национальная магистраль № 5 и автомагистраль Ханой – Хайфон проходят через район пересечения провинций Хайфон, Хайзыонг и Бакнин, становясь крупными источниками выбросов от транспортных средств. Выбросы NO_2 от двигателей автомобилей (особенно грузовиков и контейнеровозов) могут значительно влиять на концентрацию загрязнения воздуха в этих районах.

Также нельзя исключать, что из-за административных особенностей районы на границе провинций могут не иметь единообразного и четкого управления окружающей средой. Мониторинг и контроль выбросов в этих районах часто дублируются или отсутствует эффективное взаимодействие между соответствующими органами, что не является редкостью во Вьетнаме [The paradox of..., 2025]. Это приводит к выбросам от мелких производственных операций, транспортных средств низкого качества, неконтролируемого сжигания отходов и других выбросов, которые часто игнорируются, особенно в приграничных районах.

Заклучение

Исследование пространственно-временной динамики изменения концентрации NO_2 в атмосфере в Северо-Восточном Вьетнаме с 2019 по 2024 год показало, что высокие концентрации NO_2 сосредоточены в точках пересечения между провинциями Куангнинь, Хайфон, Хайзыонг и между Бакнином, Бакжангом, Хайзыонгом. Эти районы играют роль экономических центров, но одновременно представляют собой зоны с высоким риском загрязнения воздуха, что свидетельствует о значительном экологическом воздействии, которое оказывают антропогенная деятельность и промышленность на среду обитания этих регионов.

Зафиксировано значительное снижение концентрации NO_2 в 2020 году, что совпало с периодом пандемии *COVID-19*. Меры социальной изоляции, ограничения на транспорт и снижение производственной активности, вероятно, стали причиной краткосрочного уменьшения выбросов парниковых газов и загрязнения воздуха. Однако резкий рост концентрации в 2021 году, когда экономическая деятельность восстановилась, показывает, что проблема загрязнения воздуха является не только неизбежным следствием развития, но и отражает отсутствие устойчивости в нынешнем подходе к управлению и планированию развития.

Результаты исследования также подчеркивают особую значимость пограничных территорий, где наблюдается повышенное содержание диоксида азота вследствие интенсивной промышленной деятельности и транспортных потоков между провинциями. Данная ситуация подтверждает важность синхронизации усилий на межрегиональном уровне для обеспечения эффективного наблюдения и регулирования состояния атмосферы. Разработка систематических подходов к взаимодействию между муниципалитетами от организации совместного анализа данных до реализации

интегрированных стратегий управления, что позволит добиться более стабильных и всеобъемлющих результатов в снижении уровня антропогенного воздействия на воздух.

Это исследование представляет общий обзор состояния загрязнения NO₂ на территории Северо-Восточного Вьетнама и создает научную основу для разработки эффективной экологической политики и решений по управлению качеством воздуха. Продвижение технологий, таких как использование спутниковых данных и современных аналитических инструментов, рекомендуется для совершенствования мониторинга и прогнозирования экологического загрязнения воздушного бассейна. В долгосрочной перспективе необходимо ориентироваться на стратегии развития экономики с низкими выбросами, сочетая их с повышением осведомленности населения и строгим соблюдением стандартов выбросов, чтобы обеспечить приемлемое качество воздушного бассейна для обеспечения экологической безопасности населения.

Список источников

- Рязанцева А.В., Лукашина Г.В. 2008. Глобальное изменение климата, учебно-методическое пособие. Москва, МГИУ, 76 с.
- QCVN "National Technical Regulation on Ambient Air Quality" issued on March 13, 2023, Code QCVN 05:2023/BTNMT. Vietnam Ministry of Natural Resources and Environment, 12 p.
- The paradox of bordering administrative areas. SGGP. Электронный ресурс. URL: <https://www.sggp.org.vn/nghich-ly-dia-ban-giap-ranh-post224936.html> (date of access 18.01.2025)

Список литературы

- Гусев А.П., Флерко Т.Г. 2024. Пространственная и сезонная изменчивость содержаний NO₂, SO₂ и CO над территорией Беларуси. Региональные геосистемы, 48(2): 210–220. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-2-210-220>
- Логвинов И.А. 2022. Исследования пространственного развития агломераций на основе данных проекта Global Human Settlement Layer (GHSL). В кн.: ГИС-технологии в науках о Земле. Материалы республиканского научно-практического семинара студентов и молодых ученых, Минск, 16 ноября 2022. Минск, Белорусский государственный университет: 12–17.
- Морозова А.Э., Сизов О.С., Елагин П.О., Агзамов Н.А. 2022. 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, 19(4): 23–39. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39>
- Ракитин В.С., Груздев А.Н., Кириллова Н.С., Федорова Е.И., Елохов А.С., Сафронов А.Н. 2023. Валидация результатов измерений содержания NO₂ в тропосфере и стратосфере с помощью спутникового прибора TROPOMI по наземным измерениям на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Оптика атмосферы и океана, 36(1(408)): 32–41. <https://doi.org/10.15372/AOO20230105>
- Царев Ю.В., Рыжкова Е.И. 2023. Разработка облачного приложения для определения содержания формальдегида в атмосферном воздухе по данным спутника Sentinel-5P. Южно-сибирский научный вестник, 6(52): 31–35. <https://doi.org/10.25699/SSSB.2023.52.6.050>
- Behera M.D., Mudi S., Shome P., Das P.K., Kumar S., Joshi A., Rathore A., Deep A., Kumar A., Sanwariya Ch., Kumar N., Chandrakar R., Seshadri S., Mukherjee Sh., Bhattaram Sh.K., Sirivella Z. 2021. COVID-19 Slowdown Induced Improvement in Air Quality in India: Rapid Assessment Using Sentinel-5P TROPOMI Data. Geocarto International, 37(25): 8127–8147. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1993351>
- Bodah B.W., Neckel A., Maculan L.S., Milanes C.B., Korcelski C., Ramírez O., Mendez-Espinosa J.F., Bodah E.T., Oliveira M.L.S. 2022. Sentinel-5P TROPOMI Satellite Application for NO₂ and CO Studies Aiming at Environmental Valuation. Journal of Cleaner Production, 357: 131960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131960>
- Chinh L.T.D., Hang H.T., Quynh B.D. 2023. Application of Sentinel-5P TROPOMI Data on the Google



- Earth Engine Platform for Air Pollution Monitoring in Thai Nguyen City. *Journal of Science and Technology in Construction*, Hanoi University of Civil Engineering, 17(2V): 78–94.
- Ganbat G., Lee H., Jo H.W., Jadamba B., Karthe D. 2022. Assessment of COVID-19 Impacts on Air Quality in Ulaanbaatar, Mongolia, Based on Terrestrial and Sentinel-5P TROPOMI Data. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(10): 220196. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220196>
- Kanniah K.D., Zaman N.A.F.K., Perumal K. 2021. Analysis of NO₂ Tropospheric Column amount at Airports in Malaysia Before and during COVID-19 Pandemic Using SENTINEL-5P Tropomi Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2021: 399–403. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-399-2021>
- Kaplan G., Avdan Z.Y., Avdan U. 2019. Spaceborne Nitrogen Dioxide Observations from the Sentinel-5P TROPOMI over Turkey. *Proceedings*, 18(1): 4. <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06181>
- Kaplan G., Avdan Z.Y. 2020. Space-Borne Air Pollution Observation from Sentinel-5p TROPOMI: Relationship Between Pollutants, Geographical and Demographic Data. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(3): 130–137. <https://doi.org/10.26833/ijeg.644089>
- Kuehn B.M. 2014. WHO: More Than 7 Million Air Pollution Deaths Each Year. *JAMA*, 311(15): 1486. <https://doi.org/10.1001/jama.2014.4031>
- Liu X., Yi G., Zhou X., Zhang T., Lan Y., Yu D., Wen B., Hu J. 2021. Atmospheric NO₂ Distribution Characteristics and Influencing Factors in Yangtze River Economic Belt: Analysis of the NO₂ Product of TROPOMI/Sentinel-5P. *Atmosphere*, 12(9): 1142. <https://doi.org/10.3390/atmos12091142>
- Magro C., Nunes L., Gonçalves O., Neng N.R., Nogueira J.M.F., Rego F.C., Vieira P. 2021. Atmospheric Trends of CO and CH₄ from Extreme Wildfires in Portugal Using Sentinel-5P TROPOMI Level-2 Data. *Fire*, 4(2): 25. <https://doi.org/10.3390/fire4020025>
- Maurya N. K., Pandey P. C., Sarkar S., Kumar R., Srivastava P.K. 2022. Spatio-Temporal Monitoring of Atmospheric Pollutants Using Earth Observation Sentinel 5P TROPOMI Data: Impact of Stubble Burning a Case Study. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(5): 301. <https://doi.org/10.3390/ijgi11050301>
- Savenets M. 2021. Air Pollution in Ukraine: a View from the Sentinel-5P satellite. *IDŐJÁRÁS Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 125(2): 271–290. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.6>
- Shetty Sh., Schneider Ph., Stebel K., Hamer P.D., Kylling A., Berntsen T.K. 2024. Estimating Surface NO₂ Concentrations over Europe Using Sentinel-5P TROPOMI Observations and Machine Learning. *Remote Sensing of Environment*, 312: 114321. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114321>
- Thao D.T.P., Ngo N.V., Son V.K. 2022. Mapping the Distribution of NO₂ and SO₂ Concentrations in the Hanoi Area Using Sentinel-5P Remote Sensing Data. *Journal of Surveying and Mapping Science*, 54: 46–53.
- Van Geffen J., Eskes H., Compernelle S., Pinardi G., Verhoelst T., Lambert J.Ch., Sneep M., Linden M.T., Veefkind J.P. 2022. Sentinel-5P TROPOMI NO₂ Retrieval: Impact of Version v2. 2 Improvements and Comparisons with OMI and Ground-Based Data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(7): 2037–2060.
- Verhoelst T., Compernelle S., Pinardi G., Lambert J.C., Eskes H.J., Eichmann K.U., Fjaeraa A.M., Granville J., Niemeijer S., Cede A., Tiefengraber M., Hendrick F., Pazmino A., Bais A., Bazureau A., Boersma K.F., Bogner K., Dehn A., Donner S., Elokhov A., Gebetsberger M., Goutail F., de La Mora M.G., Gruzdev A., Gratsea M., Hansen G.H., Irie H., Jepsen Nis., Kanaya Y., Karagkiozidis D., Kivi R., Kreher K., Levelt P.F., Liu C., Mueller M., Comas M.N., Piters A.J.M., Pommereau J.P., Portafaix T., Prados-Roman C., Puertedura O., Querel R., Remmers J., Richter A., Rimmer J., Cardenas C.R., de Miguel L.S., Sinyakov V.P., Stremme W., Strong K., Van Roozendael M., Veefkind J.P., Wagner T., Wittrock F., Gonzalez M.Y., Zehner C. 2021. Ground-Based Validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ Measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia Global Networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1): 481–510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>
- Virghileanu M., Săvulescu I., Mihai B.A., Nistor C., Dobre R. 2020. Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing*, 18(1): 3575. <https://doi.org/10.3390/rs12213575>

References

- Gusev A.P., Flerko T.G. 2024. Spatial and Seasonal Variability of NO₂, SO₂ and CO Contents over the Territory of Belarus. *Regional Geosystems*, 48(2): 210–220 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-2-210-220>
- Logvinov I.A. 2022. Issledovaniya prostranstvennogo razvitiya aglomeratsiy na osnove dannykh proekta Global Human Settlement Layer (GHSL) [Research of Spatial Development of Agglomerations Based on data of the Global Human Settlement Layer (GHSL) project]. In: GIS-tekhnologii v naukakh o Zemle [GIS technologies in Earth sciences]. Proceedings of the Republican Scientific and Practical Seminar of Students and Young Scientists, Minsk, 16 November 2022. Minsk, Publ. Belorusskiy gosudarstvennyy universitet: 12–17.
- Morozova A.E., Sizov O.S., Elagin P.O., Agzamov N.A. 2022. Integral Assessment of Atmospheric Air Quality in the Largest Cities of Russia Based on Tropomi (Sentinel-5p) Data for 2019–2020. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 19(4): 23–39 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39>
- Rakitin V.S., Gruzdev A.N., Kirillova N.S., Fedorova E.I., Elovkhov A.S., Safronov A.N. 2023. Validation of Results of Measurements of the NO₂ Contents in the Troposphere and Stratosphere with the Tropomi Satellite Instrument on the Basis of Ground-Based Measurements at the Zvenigorod Scientific Station of A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. *Optika Atmosfery i Okeana*, 36(1(408)): 32–41 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/AOO20230105>
- Tsarev Yu.V., Ryzhkova E.I. 2023. Determination of Formaldehyde Content in the Air of Yaroslavl According to Sentinel-5p Satellite Data. *South-Siberian Scientific Bulletin*, 6(52): 31–35 (in Russian). <https://doi.org/10.25699/SSSB.2023.52.6.050>
- Behera M.D., Mudi S., Shome P., Das P.K., Kumar S., Joshi A., Rathore A., Deep A., Kumar A., Sanwariya Ch., Kumar N., Chandrakar R., Seshadri S., Mukherjee Sh., Bhattaram Sh.K., Sirivella Z. 2021. COVID-19 Slowdown Induced Improvement in Air Quality in India: Rapid Assessment Using Sentinel-5P TROPOMI Data. *Geocarto International*, 37(25): 8127–8147. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1993351>
- Bodah B.W., Neckel A., Maculan L.S., Milanes C.B., Korcelski C., Ramírez O., Mendez-Espinosa J.F., Bodah E.T., Oliveira M.L.S. 2022. Sentinel-5P TROPOMI Satellite Application for NO₂ and CO Studies Aiming at Environmental Valuation. *Journal of Cleaner Production*, 357: 131960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131960>
- Chinh L.T.D., Hang H.T., Quynh B.D. 2023. Application of Sentinel-5P TROPOMI Data on the Google Earth Engine Platform for Air Pollution Monitoring in Thai Nguyen City. *Journal of Science and Technology in Construction*, Hanoi University of Civil Engineering, 17(2V): 78–94.
- Ganbat G., Lee H., Jo H.W., Jadamba B., Karthe D. 2022. Assessment of COVID-19 Impacts on Air Quality in Ulaanbaatar, Mongolia, Based on Terrestrial and Sentinel-5P TROPOMI Data. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(10): 220196. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220196>
- Kanniah K.D., Zaman N.A.F.K., Perumal K. 2021. Analysis of NO₂ Tropospheric Column amount at Airports in Malaysia Before and during COVID-19 Pandemic Using SENTINEL-5P Tropomi Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2021: 399–403. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-399-2021>
- Kaplan G., Avdan Z.Y., Avdan U. 2019. Spaceborne Nitrogen Dioxide Observations from the Sentinel-5P TROPOMI over Turkey. *Proceedings*, 18(1): 4. <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06181>
- Kaplan G., Avdan Z.Y. 2020. Space-Borne Air Pollution Observation from Sentinel-5p TROPOMI: Relationship Between Pollutants, Geographical and Demographic Data. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(3): 130–137. <https://doi.org/10.26833/ijeg.644089>
- Kuehn B.M. 2014. WHO: More Than 7 Million Air Pollution Deaths Each Year. *JAMA*, 311(15): 1486. <https://doi.org/10.1001/jama.2014.4031>
- Liu X., Yi G., Zhou X., Zhang T., Lan Y., Yu D., Wen B., Hu J. 2021. Atmospheric NO₂ Distribution Characteristics and Influencing Factors in Yangtze River Economic Belt: Analysis of the NO₂ Product of TROPOMI/Sentinel-5P. *Atmosphere*, 12(9): 1142. <https://doi.org/10.3390/atmos12091142>
- Magro C., Nunes L., Gonçalves O., Neng N.R., Nogueira J.M.F., Rego F.C., Vieira P. 2021. Atmospheric Trends of CO and CH₄ from Extreme Wildfires in Portugal Using Sentinel-5P TROPOMI Level-2 Data. *Fire*, 4(2): 25. <https://doi.org/10.3390/fire4020025>
- Maurya N. K., Pandey P. C., Sarkar S., Kumar R., Srivastava P.K. 2022. Spatio-Temporal Monitoring of



- Atmospheric Pollutants Using Earth Observation Sentinel 5P TROPOMI Data: Impact of Stubble Burning a Case Study. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(5): 301. <https://doi.org/10.3390/ijgi11050301>
- Savenets M. 2021. Air Pollution in Ukraine: a View from the Sentinel-5P satellite. IDŐJÁRÁS Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service, 125(2): 271–290. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.6>
- Shetty Sh., Schneider Ph., Stebel K., Hamer P.D., Kylling A., Berntsen T.K. 2024. Estimating Surface NO₂ Concentrations over Europe Using Sentinel-5P TROPOMI Observations and Machine Learning. Remote Sensing of Environment, 312: 114321. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114321>
- Thao D.T.P., Ngo N.V., Son V.K. 2022. Mapping the Distribution of NO₂ and SO₂ Concentrations in the Hanoi Area Using Sentinel-5P Remote Sensing Data. Journal of Surveying and Mapping Science, 54: 46–53.
- Van Geffen J., Eskes H., Compernelle S., Pinardi G., Verhoelst T., Lambert J.Ch., Sneep M., Linden M.T., Veefkind J.P. 2022. Sentinel-5P TROPOMI NO₂ Retrieval: Impact of Version v2. 2 Improvements and Comparisons with OMI and Ground-Based Data. Atmospheric Measurement Techniques, 15(7): 2037–2060.
- Verhoelst T., Compernelle S., Pinardi G., Lambert J.C., Eskes H.J., Eichmann K.U., Fjaeraa A.M., Granville J., Niemeijer S., Cede A., Tiefengraber M., Hendrick F., Pazmino A., Bais A., Bazureau A., Boersma K.F., Bogner K., Dehn A., Donner S., Elokho A., Gebetsberger M., Goutail F., de La Mora M.G., Gruzdev A., Gratsea M., Hansen G.H., Irie H., Jepsen Nis., Kanaya Y., Karagkiozidis D., Kivi R., Kreher K., Levelt P.F., Liu C., Mueller M., Comas M.N., Piter A.J.M., Pommereau J.P., Portafaix T., Prados-Roman C., Puertedura O., Querel R., Remmers J., Richter A., Rimmer J., Cardenas C.R., de Miguel L.S., Sinyakov V.P., Stremme W., Strong K., Van Roozendaal M., Veefkind J.P., Wagner T., Wittrock F., Gonzalez M.Y., Zehner C. 2021. Ground-Based Validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ Measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia Global Networks. Atmospheric Measurement Techniques, 14(1): 481–510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>
- Vîrghileanu M., Săvulescu I., Mihai B.A., Nistor C., Dobre R. 2020. Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. Remote Sensing, 18(1): 3575. <https://doi.org/10.3390/rs12213575>

*Поступила в редакцию 01.04.2025;
поступила после рецензирования 02.05.2025;
принята к публикации 11.05.2025*

*Received April 01, 2025;
Revised May 02, 2025;
Accepted May 11, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Чунг Хиеу, аспирант кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды факультета географии, геоэкологии и туризма, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Куrolап Семен Александрович, доктор географических наук, профессор, декан факультета географии, геоэкологии и туризма, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Нестеров Юрий Анатольевич, кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды факультета географии, геоэкологии и туризма, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Trung H. Nguyen, Postgraduate student at the Department of Geoecology and Environmental Monitoring of the Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Semyon A. Kurolap, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Yuriy A. Nesterov, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor at the Department of Geoecology and Environmental Monitoring of the Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russia