

РАЗДЕЛ II

ГИС В УПРАВЛЕНИИ ООПТ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

ОЦЕНКА АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДА МИНСКА ДИОКСИДОМ АЗОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКА SENTINEL 5P

М. В. Бируков¹⁾, Т. В. Шлендер^{1,2)}

¹⁾ Факультет географии и геоинформатики БГУ,

*²⁾ Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь, maxbirukov2004@gmail.com*

Исследована проблема загрязнения воздуха городов диоксидом азота и его связи с поверхностной земной температурой г. Минска с помощью спутниковых данных SENTINEL-5P и MODIS. Особенности загрязнения приземных слоев атмосферы представлены посредством анализа картосхем, построенных при помощи платформы Google Earth Engine и ГИС QGIS для периода 2019-2022 гг. и конкретных случаев загрязнения.

Ключевые слова: диоксид азота; Google Earth Engine; предельно допустимая концентрация; температура земной поверхности.

ASSESSMENT OF AIR POLLUTION IN BELARUSIAN CITIES BASED ON SENTINEL-5P SATELLITE DATA

M. V. Birukov¹⁾, T. V. Schlender^{1,2)}

¹⁾ Faculty of Geography and Geoinformatics of Belarusian State University,

*²⁾ National Ozone Monitoring Research Center of Belarusian State University,
Minsk, Republic of Belarus, maxbirukov2004@gmail.com*

The problem of urban air pollution by nitrogen dioxide using SENTINEL-5P and MODIS satellite data are investigated. The peculiarities of pollution of the surface layers of the atmosphere are presented by analyzing the cartograms built with the help of Google Earth Engine platform and QGIS GIS based on Sentinel-5P and MODIS satellite images in 2019-2022.

Keywords: air pollution; nitrogen dioxide emissions, satellite images, Sentinel-5P, MODIS, QGIS, Google Earth Engine, maximum permissible concentration, land surface temperature.

Определение городского острова загрязнения было введено относительно недавно [1] для обозначения временных и пространственных изменений в концентрации загрязняющих веществ города и пригорода. Различия между пригородными, мегаполисы и сельские регионы определяют интенсивность городского загрязнения по аналогии с интенсивностью городского острова тепла. Остров тепла и загрязнение воздуха являются взаимосвязанными явлениями [1]. Высокие температуры воздуха приземного слоя ускоряют специфические химические реакции, большинство из которых приводят к увеличению образованию приземных загрязнителей воздуха, которые в свою очередь имеют обратный усиливающий эффект на температуру приземного воздуха в городе [2, 3].

В настоящее время спутниковые измерения диоксида азота (NO_2) стали важной составной частью мониторинга и анализа качества воздуха, экологических и климатических исследований. Эти измерения обрели огромное значение благодаря своей способности предоставлять информацию о распределении и концентрации NO_2 , а также о воздействии антропогенных действий на окружающую среду [4].

Диоксид азота – это продукт сжигания горючих материалов и промышленных процессов, а также важный индикатор антропогенного загрязнения воздуха. Его высокие концентрации могут оказывать негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду, включая участие в образовании смога и воздействие на климат. Спутниковые измерения NO_2 позволяют мониторить и анализировать изменения концентрации этого газа на больших территориях, что особенно важно для исследования городской и региональной атмосферной динамики способной отследить загрязнение воздуха.

Целью данной работы является определение степени загрязнения воздуха диоксидом азота г. Минска и его связи с островом тепла.

Для быстрого и эффективного получения спутниковых снимков диоксида азота Sentinel – 5P и поверхностной температуры MODIS использовался Google Earth Engine (GEE) – облачная платформа для геопространственного анализа данных [5], где сразу же обрабатывались спутниковые снимки в среднее значение (среднегодовые, среднедневные). Далее снимки диоксида азота и поверхностной температуры редактировались в ГИС QGIS с учетом пересчета полученных значений концентраций диоксида азота снимков Sentinel – 5P в ppb и $\text{мкг}/\text{м}^3$ для сравнения со значениями предельно допустимых концентраций (ПДК), которые представлены в $\text{мкг}/\text{м}^3$.

Пересчет спутниковых единиц $\text{моль}/\text{м}^2$ общего содержания диоксида азота в концентрацию в приземном слое в ppb и $\text{мкг}/\text{м}^3$ осуществлялся для столетрового приземного слоя с использованием функции ГИС QGIS "калькулятор растров" по формуле:

$$c = \frac{TC[\text{моль/м}^2] \cdot 1\text{м}^2 \cdot M(\text{NO}_2)[\text{г/моль}] \cdot R \cdot T[\text{К}]}{L[\text{м}] \cdot 1\text{м}^2 \cdot p \cdot V \cdot M(\text{Air})[\text{г/моль}]} \cdot 10^9 [\text{ppb}],$$

где c – концентрация NO_2 в столетровом слое [ppb]; TC - общее содержание NO_2 по данным спутника Sentinel 5P [моль/м²]; $M(\text{NO}_2)$ – молекулярная масса NO_2 [г/моль]; R – универсальная газовая постоянная [Дж/моль·К]; T – температура воздуха [К]; L – высота приземного слоя 100 метров [м]; p – атмосферное приземное давление [Па]; V – рассматриваемый объем воздуха [м³]; $M(\text{Air})$ – молекулярная масса воздуха [г/моль].

$$c_2[\text{мкг/м}^3] = \frac{c_1[\text{ppb}] \cdot p \cdot M(\text{Air})[\text{г/моль}]}{10^3 RT},$$

где c_2 – концентрация NO_2 [мкг/м³]; c_1 – концентрация NO_2 рассчитанная по формуле (1) [ppb]; R – универсальная газовая постоянная [Дж/моль·К]; T – температура воздуха [К]; p – атмосферное приземное давление [Па]; $M(\text{Air})$ – молекулярная масса воздуха [г/моль].

Значения ПДК были взяты из гигиенических нормативов РБ для атмосферного воздуха населенных пунктов за 2021 год, которые представлены в таблице 2.1. Для анализа антропогенной активности в г. Минске использовались данные о величинах ПДК (мкг/м³) для диоксида азота и формальдегида, а в качестве фоновой концентрации принимались значения для Березинского заповедника.

Значения ПДК для загрязняющих газов в приземной атмосфере РБ [6]

| Загрязняющие вещества | Значения ПДК, мкг/м ³ | | |
|-----------------------|----------------------------------|-----------|----------|
| | Макс.разовая | суточная | годовая |
| Азота диоксид | 250 | 100 (25*) | 40 (10*) |

*ПДК по ВОЗ [1]

Анализ среднедневных многолетних значений тропосферных концентраций NO_2 над г. Минском и Березинским заповедником за период 2019-2022 гг. выявил некоторые особенности сезонного хода, а именно: максимум концентраций наблюдался осенью (сентябрь-октябрь) и в конце зимы-начало весны (февраль-март), а минимум – в летние месяцы, как показано на рисунке 1.

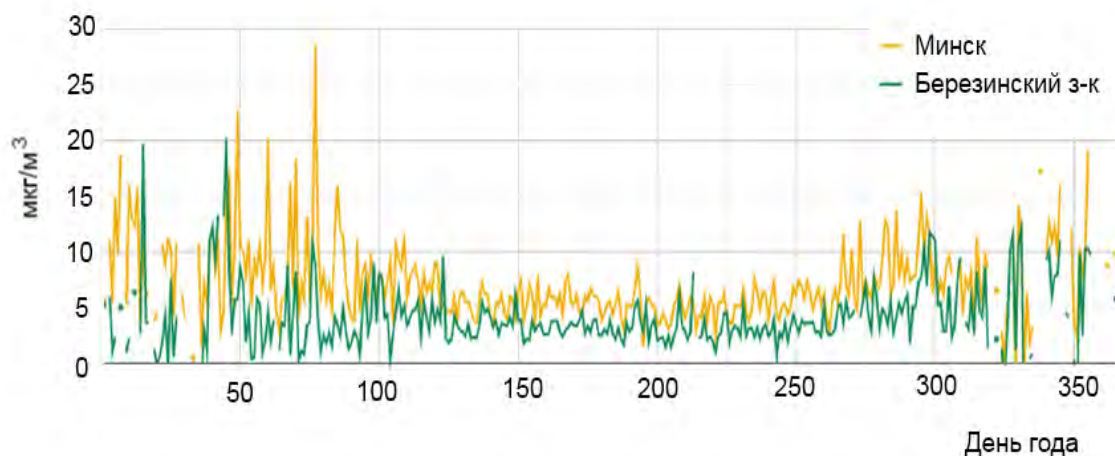


Рис. 1. Среднедневное многолетнее значение концентраций NO_2 за период 2019-2022 гг. для территории г. Минска и Березинского заповедника

Стоит отметить, что в зимние сезоны значительная часть спутниковых данных отфильтровываются из-за плохих погодных условий. Значения концентраций NO_2 в г. Минске значительно превышают фоновые значения Березинского заповедника в течении всего периода – в 2-3 раза в зависимости от сезона года (теплый период – в 1,5-2 раза; холодный период – в 2-3 раза).

Пространственные карты для значений тропосферных концентраций NO_2 для территории Минска за период 2019-2022 гг. иллюстрируют вариативность средних тропосферных концентраций в пределах 18-24 мкг/м^3 за отдельные года в рамках границ г. Минска. Тропосферные концентрации NO_2 в Минске за период 2019-2022 гг. не превышают среднегодовых значений ПДК NO_2 (40 мкг/м^3), что показано на рисунке 2 изолиниями. Но если оценивать по данным ВОЗ, где среднегодовой ПДК составляет 10 мкг/м^3 , то превышение среднегодовой концентрации NO_2 г. Минска от ПДК (ВОЗ) отличается в 2 раза. В целом, визуальное сравнение максимальных значений поверхностного острова тепла и острова загрязнения совпадают для границ г. Минска. Исследование распределения концентрации NO_2 показало, что изолинии относительно высоких концентраций NO_2 для г. Минска расположены за пределами границ города на расстояние до 15-20 км от МКАДа. По временной динамике максимальных концентраций NO_2 в рамках границ г. Минске 2020 год имеет меньшие значения (на 2-4 мкг/м^3) острова загрязнения в центре города, что может быть связано с событием пандемии COVID-19 в данный период.

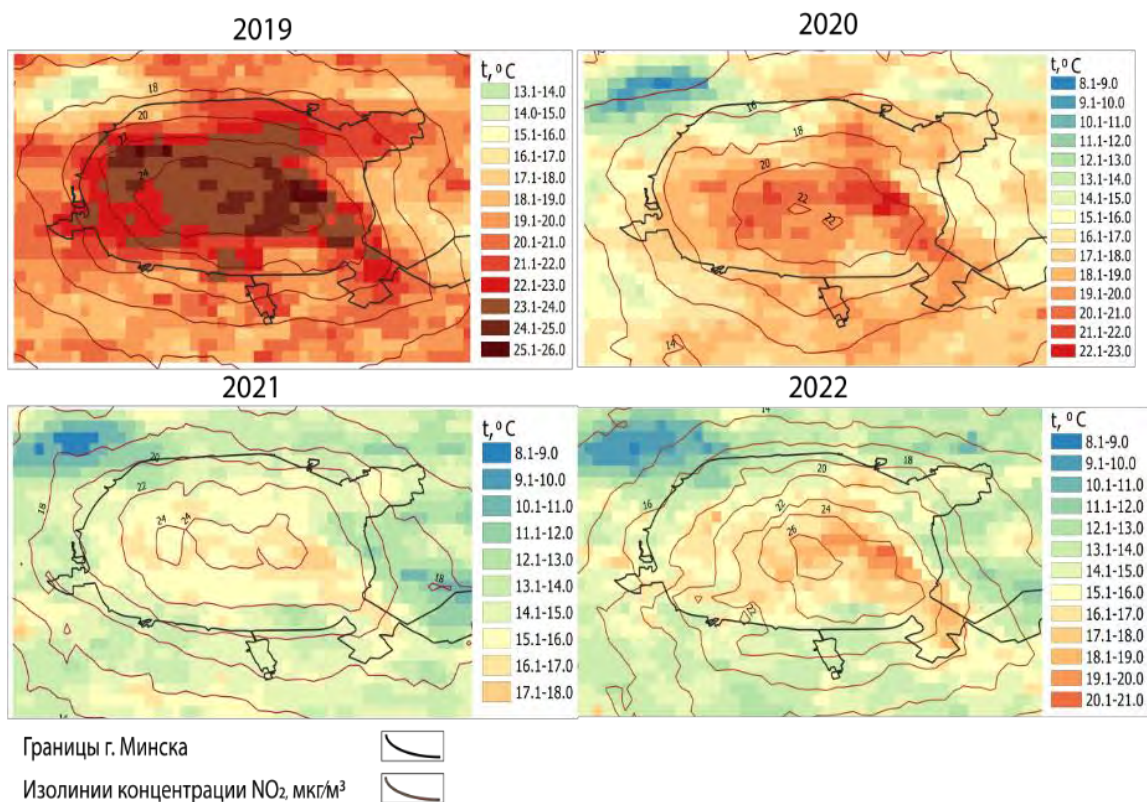


Рис. 2. Среднегодовые значения тропосферных концентраций NO₂ по данным Sentinel-5P и температуры земной поверхности по данным MODIS для территории г. Минска за период 2019-2022 гг.

Для рассмотрения конкретных случаев аномальных скачков концентраций NO₂ над г. Минском рассматривались события 2020 года, так как по данным спектрометра MARS-B [8] в этом году было несколько десятков случаев, которые отражали высокие значения концентраций NO₂. Также не все эти случаи загрязнения были доступны полноценно по спутниковым снимкам и не все случаи превышали ПДК. В связи с этим, для изучения конкретного случая по спутниковым снимкам, было выбрано подходящее событие превышения ПДК NO₂ над г. Минском 26-28 марта 2020 года.

21-25 марта по данным Белгидрометцентра [9] наблюдался северный (15 % от всех направлений ветра в этот период) и северо-восточный ветер (48,5 % от всех направлений ветра в этот период). 26-28 марта 2020 года более 40 % всех направлений ветра составил штиль и 25 % - юго-восточное направление.

На рисунке 3 представлены картосхемы концентраций NO₂ и температуры земной поверхности на даты 26-28 марта 2020 года. Значения концентраций NO₂ отражены отфильтрованными изолиниями для выделения областей среднесуточных ПДК NO₂ (100 мкг/м³) и близких к ним показателей. Соответственно, все что вне фильтра изолиний является фоновой

зоной концентраций NO_2 рассматриваемой территории. Но если использовать рекомендации ВОЗ по среднесуточному ПДК NO_2 (10 мкг/м^3), то область превышения ПДК значительно увеличится как внутри города, так и за его пределами.

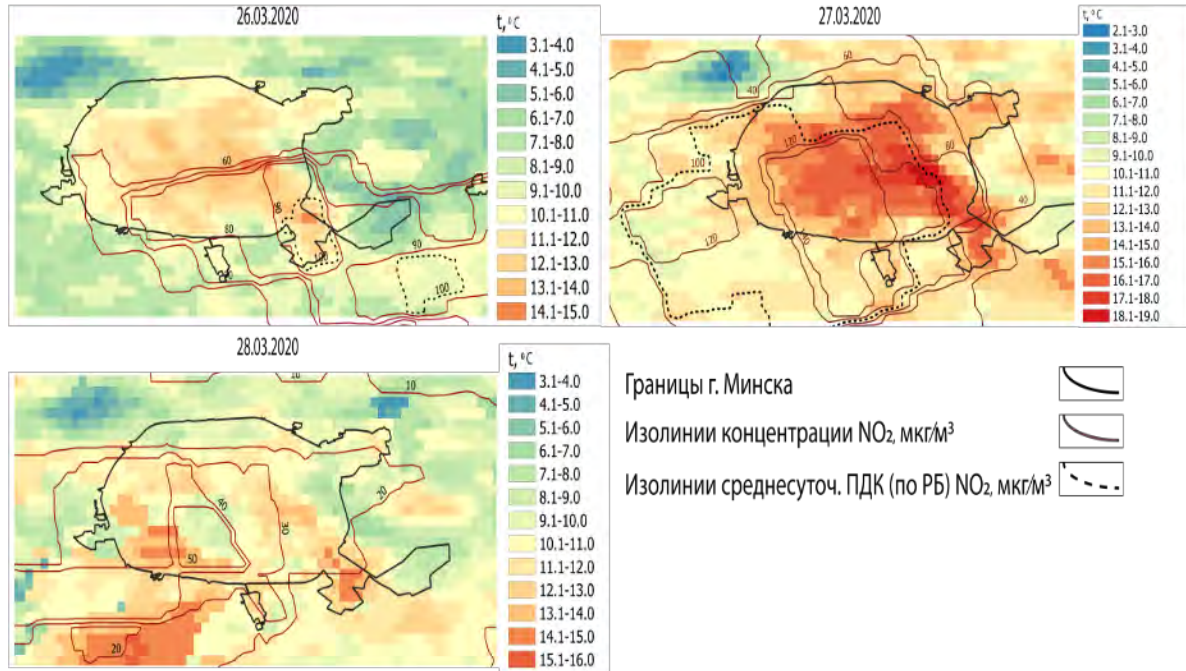


Рис. 3. Дневные значения тропосферных концентраций NO_2 по данным Sentinel 5P и температуры земной поверхности по данным MODIS для территории г. Минска за период 26-28 марта 2020 гг.

26 марта остров загрязнения был смещен на юго-восток г. Минска и распространялся далеко за пределы границ МКАД, до 30-35 км. Скорее всего этот эффект смещения был создан за счет северного ветра, который преобладал накануне. Превышения среднесуточного ПДК NO_2 в этот день наблюдалось на нескольких участках – м-н Шабаны (площадь превышения ПДК – $17,6 \text{ км}^2$) и район пос. Привольный (площадь превышения ПДК – $19,4 \text{ км}^2$). Максимальные температуры земной поверхности ($13 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше) были характерны для центральной и юго-восточной части г. Минска.

27 марта были зафиксированы максимальные концентрации NO_2 , рассматриваемого периода, так как в этот день был слабый юго-восточный ветер. Площадь превышения среднесуточного ПДК ($374,5 \text{ км}^2$) распространялась далеко на юго-запад (до 9-13 км, а сам «остров загрязнения» - до 20 км) от границ г. Минска. Площадь превышения ПДК NO_2 в самом городе составила – $166,6 \text{ км}^2$. Ширина «острова» составила – $92,7 \text{ км}$, а

длинна – 34,7 км. Также это был самый теплый день из всех рассмотренных. Температура земной поверхности достигала 17-18 °С в центральной, восточной и юго-восточной части города.

28 марта превышений среднесуточного ПДК NO₂ не наблюдалось. Остров загрязнения распространялся далеко за город (до 25 км к юго-западу от МКАД). Максимальные температуры земной поверхности достигали 15 °С в основном в южной части города, которые территориально совпадали с максимальными концентрациями диоксида азота.

В конце марта отчетливо наблюдаются повышения тропосферных концентраций NO₂ в г. Минске по сравнению с фоновыми значениями. 25–26 марта повышение концентрации имело место на всех территориях, что можно объяснить глобальным общим переносом концентраций диоксида азота. Но превышения 27 марта имело место только в г. Минске и составило в 4-5 раз выше, чем над фоновой территорией, например, пригородных территорий или Березинского заповедника. Возможным объяснением такого превышения ПДК диоксида азота в г. Минске может быть несколько факторов. Первый – выбросы промышленных предприятий. Второй – повышенная плотность автотранспорта при въезде/выезде в город (основные проспекты – Дзержинского, Логойский тракт, Партизанский, Победителей).

Таким образом, превышения ПДК диоксида азота в г. Минске и зона его распространения зависят от антропогенных выбросов (промзоны и автотранспорта) и погодных условий (направление и скорости ветра). Скорее всего, степень нагрева подстилающей поверхности может зависеть не только от структуры материала самой поверхности, наличия выбросов промышленных предприятий, но и от интенсивности автомобильного трафика в г. Минске, так как рассмотренный случай выпал на четверг (26 марта), пятницу (27 марта) и субботу (28 марта), когда большая часть жителей выезжает из города, тем самым создавая пробки и повышенный выброс загрязнителей в приземную атмосферу.

Уникальность спутниковых данных по концентрации NO₂ в том, что отражает пространственный охват большой территории, где можно выделить зоны превышения ПДК или фоновые участки.

По данным совокупных наблюдений с использованием информации наземных пунктов, многоосевого спектрометра MARS-B и приборов на спутниковой платформе, остров загрязнения г. Минска в среднем распространяется в высоту до 100-150 метров, имеет ширину с запада на восток 45-55 км и протяженность с севера на юг 40-45 км. Таким образом, остров загрязнений может выходить за пределы границ города на расстояние до 15-20 км от МКАДа. Кроме того, остров загрязнения г. Минска постоянно

смещается в зависимости от направления ветра. В отдельные периоды времени происходит смещение острова загрязнений в каком-либо направлении в черте г. Минска и пригороде, в зависимости от преобладающего направления ветра, что может сказываться на качестве воздуха в спальных районах, особенно когда ветер имеет восточное, юго- и северо-восточное направление. В безветренную погоду загрязнения имеют тенденцию к накоплению. В зимний сезон наблюдается более высокие значения концентраций NO₂, чем летом. В связи с этим зимний период (с ноября по март) является самым грязным с точки зрения качества воздуха в г. Минске.

Библиографические ссылки

1. *Crutzen P. J.* New directions: the growing urban heat and pollution “island” effect - impact on chemistry and climate // *Atmos. Environ.* 2004. Vol. 38. P. 3539–3540.
2. *Elsayed I. S. M.* Mitigation of the urban heat island of the city of Kuala Lumpur, Malaysia. *Middle East Journal of Scientific Research.* 2012. № 11. P. 1602–1613.
3. *Sarrat C., Lemonsu A., Masson V., Guedalia D.* Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmos. Environ.* 2006. № 40 (10). P. 1743–1758.
4. *Virghileanu M., Săvulescu I., Mihai B.-A., Nistor C., Dobre R.* Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing.* 2020. № 12 (21). № 3575.
5. Google Earth Engine [Электронный ресурс]. URL: <https://code.earthengine.google.com/> (дата обращения: 04.09.2023).
6. Гигиенические нормативы 2.1.6.12-6-2006 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) микроорганизмов в атмосферном воздухе населенных мест»: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 03.04.2006 г. № 41.
7. WHO [Электронный ресурс]. URL: <https://www.c40knowledgehub.org/s/article/WHO-Air-Quality-Guidelines> (дата обращения: 04.09.2023).
8. *Бручковский И. И.* Восстановление вертикального профиля концентрации тропосферной двуокиси азота по результатам измерений в Минске // *Журнал БГУ. Физика.* 2020. №1. С. 95–104.
9. Архив погоды городских метеостанций г. Минска, [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.by/> (дата обращения: 05.09.2023).