

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТРОВА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДА МИНСКА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ SENTINEL-5P И MODIS

*Т. В. Шлендер<sup>1</sup>, М. В. Бируков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Научный сотрудник, Учреждение БГУ «Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы», г. Минск, Республика Беларусь, timajaya@mail.ru

<sup>2</sup> Студент, факультет географии и геоинформатики БГУ, г. Минск, Республика Беларусь, maxbirukov2004@gmail.com

### **Аннотация**

В данной работе исследуются параметры городского острова тепла и загрязнений с использованием спутниковых данных Sentinel 5P и MODIS для г. Минска. С помощью онлайн платформ Google Earth Engine и ГИС QGIS анализируются среднедневные многолетние и среднегодовые значения тропосферных концентраций диоксида азота и температуры поверхности земли для г. Минска. Делаются выводы о превышении предельно допустимых концентраций (ПДК) концентрации диоксид азота над г. Минском и возможной связи двух явлений.

**Ключевые слова:** остров загрязнения, остров тепла, диоксид азота, поверхностная температура, спутниковые данные, ПДК.

## DETERMINATION OF THE ISLAND OF POLLUTION OF THE CITY OF MINSK BASED ON SATELLITE DATA SENTINEL-5P AND MODIS

*T. V. Schlender<sup>1</sup>, M. V. Birukov<sup>2</sup>*

### **Abstract**

In this paper, the parameters of the urban heat island and pollution are investigated using Sentinel 5P and MODIS satellite data for the city of Minsk. With the help of online platforms Google Earth Engine and GIS QGIS, the average daily long-term and average annual values of tropospheric concentrations of nitrogen dioxide and the surface temperature for the city of Minsk are analyzed. Conclusions are drawn about the excess of the maximum allowable concentrations (MAC) concentration of nitrogen dioxide over the city of Minsk and a possible connection between the two phenomena.

**Keywords:** pollution island, heat island, nitrogen dioxide, surface temperature, satellite data, MAC.

**Введение.** Городской остров загрязнения (ГОЗ) представляет собой явление, когда качество воздуха в городе оказывается значительно хуже в сравнении с

окружающими сельскими районами. Термин «городской остров загрязнения» был введен сравнительно недавно [1] для обозначения пространственно-временного загрязнения городских территорий. Интенсивность острова загрязнения определяется как разница между городскими районами и пригородными/сельскими районами по аналогии, как и с островом тепла.

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) за 2016 г., Беларусь занимает 100 место (и находится в 10-ке среди стран Европы) в списке из 179 стран с самым высоким ежегодным показателем смертности от загрязнения воздуха на 100 тыс. жителей [2]. Смертность может быть связана не только с качеством воздуха, на которое влияют загрязняющие вещества ( $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO$  и твердые частицы), но и с волнами тепла [3]. Указанные загрязняющие вещества могут вызвать различные проблемы со здоровьем, включая респираторные заболевания, сердечные заболевания и инсульт.

Городской остров тепла (ГОТ) – это явление, при котором из-за деятельности человека в городских районах температура воздуха оказывается выше, чем в сельской местности [4]. Строительство зданий и асфальтирование поверхностей приводит к уменьшению доли растительного покрова и количества водоемов, что в совокупности с выделяемым антропогенным теплом, приводит к увеличению температуры городской среды, которая может быть на несколько градусов выше, чем в окружающей сельской местности [5, 6]. Таким образом, можно говорить о тепловом загрязнении города [7].

В работе [8] была сформирована мезоклиматическая схема районов г. Минска на основе метеостанций в различных частях города с учетом плотности городской застройки за период 1971-1972 гг. Было замечено, что высокая плотность застройки и промышленных территорий в Заводском районе влияет на ночные температуры, значения которых схожи с центральной частью города в безоблачные дни. Выделен ГОТ по кривым температуры воздуха окраинных и городских станций в различные сезоны года.

Согласно исследованиям по г. Минску в 2011 году [9], для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха автотранспортом были проведены расчеты выбросов загрязняющих веществ автотранспортом на 216 магистралях (и их участках) города с использованием программы «Магистраль-город» (версия 2.3), результаты, которые затем были экспортированы в УПРЗА «Эколог». Максимальные уровни загрязнения фиксируются в часы пик: с 7.00 до 9.00 и с 17.00 до 19.00. В Минске 85 % выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух приходится на автотранспорт, остальные 15 % – на промышленные предприятия столицы. Авторы выделили три зоны с сильным уровнем загрязнения атмосферного воздуха в г. Минске. Первая - северо-западная часть города (жилая застройка между ул. Кальварийской и проспектами Пушкина, Победителей и Машерова, которые находятся в зоне влияния ОАО «Минский завод отопительного оборудования» и ЗАО «Атлант»). Вторая зона - восточная часть города (район расположения «Минский тракторный завод» и «Минский моторный завод»). Третья зона - юго-восточная часть города (район расположения «Минский автомобильный завод»). Основное загрязнение

создается автотранспортом, но наблюдается его усиление за счет выбросов стационарных источников [9].

В работе [10] было статистически оценена взаимосвязь между островом тепла (измеренным между городским центром и тремя разными пригородными станциями) и городским загрязнением на основе ежечасных измерений температуры воздуха, относительной влажности, скорости ветра и загрязняющих веществ, составляющих общий индекс качества воздуха, а именно NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> и SO<sub>2</sub>. Корреляционный анализ и линейная регрессия выявили значимую взаимосвязь между островом тепла и каждым анализируемым загрязнителем, хотя в целом наибольшая значимость проявлялась при задержке на 1–5 ч, при характеристике в зависимости от времени суток и конкретного загрязняющего вещества.

В исследовании [11] представлен сравнительный анализ пространственной конфигурации тропосферного столба NO<sub>2</sub> над Европой между аналогичными периодами в 2019 и 2020 годах на основе продуктов ESA Copernicus Sentinel-5P. Результаты показывают динамику загрязнения NO<sub>2</sub> при резком переходе от нормального состояния к карантинным мерам после пандемии COVID-19, характеризующемуся кратковременным снижением интенсивности дорожного движения и промышленной деятельности, обнаруживая заметное снижение плотности столбца NO<sub>2</sub> в тропосфере даже на 85%. в некоторых европейских крупных городах.

Мониторинг и регулирование загрязнения NO<sub>2</sub> является необходимой задачей, помогающей лицам, принимающим решения, искать устойчивое решение для улучшения качества окружающей среды и состояния здоровья населения [12]. Поэтому совместное изучение ГОТ и ГОЗ г. Минска является важной задачей для решения эколого-климатических проблем населения города, архитектурного планирования застройки города и развития концепции умного города.

В связи с этим, целью данной работы является определение параметров ГОЗ г. Минска с помощью спутниковых наблюдений.

**Материалы и методы.** Спутниковая миссия Sentinel-5P (S5P) была запущена в октябре 2017 года и предназначена для мониторинга атмосферы в рамках программы EU Copernicus [13]. Sentinel-5P оснащен спектрометром TROPOMI (инструмент для мониторинга атмосферы), который охватывает диапазоны длин волн от 270 нм и до 2350 нм. S5P позволяет получать содержания малых газовых составляющих, таких как NO<sub>2</sub>, озон, формальдегид, SO<sub>2</sub>, метан, окись углерода и аэрозоли. Спутниковые снимки производятся ежедневно (орбита пересечения экватора по локальному времени 13:30, значит над г. Минском снимки имеют время около 9-10 ч локального времени) с пространственным разрешением около 5,5 км × 3,5 км (от 7 км до 5,5 км до августа 2019 г.). S5P предоставляет данные по общему содержанию NO<sub>2</sub> между поверхностью земли и верхней частью тропосферы – тропопаузой. Важно учитывать, что качество доступных снимков сильно зависит от погодных условий, наличия облачности и других параметров, включая ошибки датчиков.

На более высоких широтах сканирование перекрывается из-за околополярной солнечно-синхронной орбиты спутника.

Спутниковый инструмент MODIS [14] был запущен в 1999 году на базе платформы Terra, имел время пересечения экватора 10:30, с 2002 года на базе спутника Aqua пересекает экватор в 13.30 по Минскому времени. Данные MODIS дневной температуры земной поверхности с разрешением в 1 км использовались для определения степени нагрева подстилающей поверхности г. Минска (отдельно есть коллекция ночных данных).

Все полученные данные о распределении диоксида азота и температуры земной поверхности, как S5P, так и MODIS имеют по одному снимку в сутки для г. Минска в промежутке 9-10 ч. дня по Минскому времени, так как оба спутника пересекают экватор в 13.30 по Минскому времени.

Таким образом, в настоящей работе использовались все доступные спутниковые измерения усредненные за несколько дней, что означает объединение данных с нескольких спутниковых орбит с различными параметрами сетки и геометриями визирования.

Далее для быстрого и эффективного получения спутниковых снимков использовалась Google Earth Engine (GEE) – облачная платформа для геопространственного анализа данных в планетарных масштабах. Она позволяет использовать огромные вычислительные мощности компании Google для изучения самых разнообразных проблем: потерь лесов, засухи, стихийных бедствий, эпидемий, продовольственной безопасности, управления водными ресурсами, изменения климата и защиты окружающей среды [15].

GEE – включает в себя многопетабайтный каталог данных, интегрированный с высокопроизводительным кластером серверов для параллельных вычислений [16]. Большая часть каталога состоит из снимков для дистанционного зондирования Земли, включая весь архив миссии Landsat, а также полные архивы данных от европейских спутников Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-5P и MODIS [17].

В GEE создавались скрипты, которые позволяли формировать готовые файлы в формате GeoTIFF для средних значений тропосферного столба диоксида азота и поверхностной температуры за период 2019-2022 гг. над территорией г. Минска и пригорода по спутниковым снимкам.

Полученные изображения в формате GeoTIFF по умолчанию являются чёрно-белым, поэтому преобразования в итоговые цветные картосхемы производились в ГИС QGIS. Пересчет единиц моль/м<sup>2</sup> общего содержания диоксида азота в концентрацию в приземном слое *ppb* осуществлялся для стометрового приземного слоя (так как это основная высота пограничного слоя г. Минска [18]) с использованием функции "калькулятор растров" по формуле:

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

где  $c$  – концентрация NO<sub>2</sub> в стометровом слое [*ppb*];  $TC$  - общее содержание NO<sub>2</sub> по данным спутника Sentinel 5P [моль/м<sup>2</sup>];  $M(\text{NO}_2)$  – молекулярная масса

$\text{NO}_2$  [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 [м<sup>3</sup>];  $M(\text{Air})$  – молекулярная масса воздуха [г/моль].

ПДК – это предельно допустимая концентрация, максимальное количество вредного вещества в единице объема или массы, которое при ежедневном воздействии в течение неограниченного времени не вызывает каких-либо болезненных изменений в организме и неблагоприятных наследственных изменений у потомства [19]. Фоновая концентрация вредного вещества является характеристикой загрязнения атмосферы, создаваемой всеми источниками выбросов на рассматриваемой территории, исключая источник, для которого рассчитывается фон.

Для сравнения рассчитанных величин концентрации в приземной стометровой зоне с величинами (ПДК)  $\text{NO}_2$  [мкг/м<sup>3</sup>], использовалась формула:

$$c_2[\text{мкг/м}^3] = \frac{c_1[\text{ppb}] \cdot p \cdot M(\text{Air})[\text{г/моль}]}{10^3 RT}, \quad (2)$$

где  $c_2$  – концентрация  $\text{NO}_2$  [мкг/м<sup>3</sup>];  $c_1$  – концентрация  $\text{NO}_2$  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 1. Для анализа антропогенной активности в г. Минске использовались данные о величинах ПДК (мкг/м<sup>3</sup>) для диоксида азота и формальдегида, а в качестве фоновой концентрации принимались значения для Березинского заповедника.

**Таблица 1** – Значения ПДК для диоксида азота в приземной атмосфере РБ [19]

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

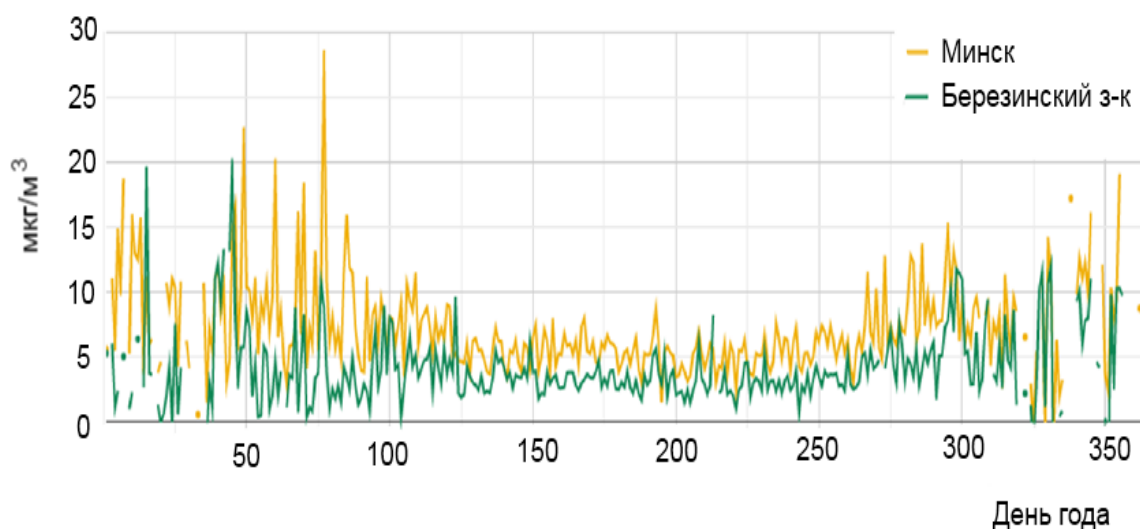
\*ПДК по ВОЗ [20]

Для проведения сравнительного анализа концентраций  $\text{NO}_2$  над территорией г. Минска и Березинским заповедником, был использован скрипт позволяющий получить на одном изображении концентрации диоксид азота для различных выбранных территорий.

Построение итоговых картосхем спутниковых снимков производилось в ГИС QGIS, где осуществлялись преобразования единиц по формулам (1 и 2), выделялись граничные изолинии ПДК, высчитывались геометрические параметры островов загрязнения и тепла.

**Результаты и обсуждение.** Анализ среднедневных многолетних значений тропосферных концентраций  $\text{NO}_2$  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-начале весны (февраль-март), а минимум – в летние месяцы, как показано на рисунке 1, что согласуется с данными, представленными в [21].

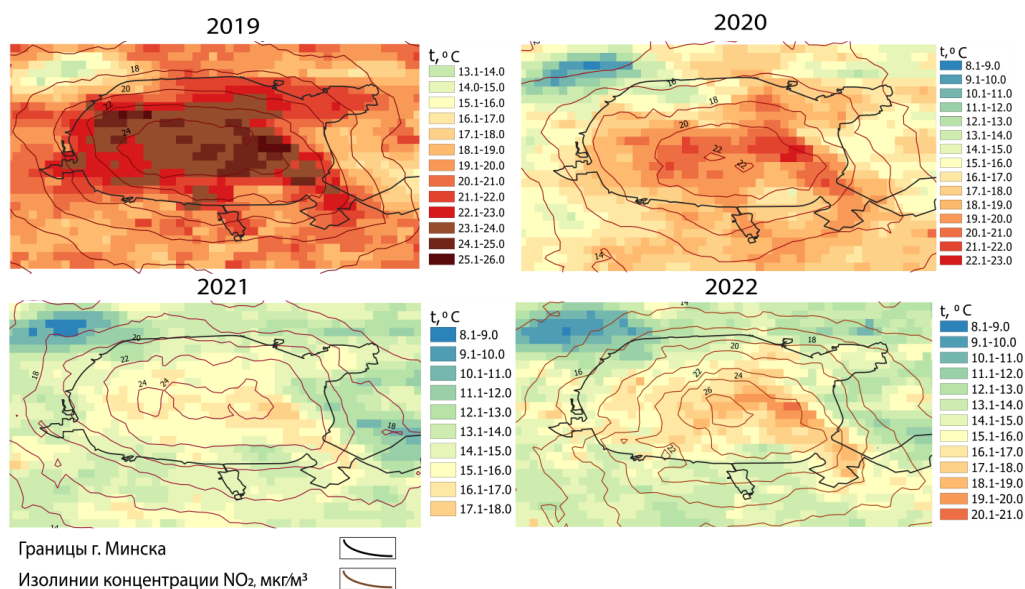


**Рисунок 1** – Среднедневное многолетнее значение концентрации  $\text{NO}_2$  за период 2019-2022 гг. для территории г. Минска и Березинского заповедника

Стоит отметить, что в зимние сезоны значительная часть спутниковых данных отфильтровываются из-за плохих погодных условий. Значения концентраций  $\text{NO}_2$  в г. Минске значительно превышают фоновые значения Березинского заповедника в течении всего периода – в 2-3 раза в зависимости от сезона года (летом – в 1,5-2 раза; зимой – в 2-3 раза).

Пространственные карты для значений тропосферных концентраций  $\text{NO}_2$  для территории Минска за период 2019-2022 гг. иллюстрируют вариативность средних тропосферных концентраций в пределах 18-24  $\text{мкг/м}^3$  за отдельные года в рамках границ г. Минска. Тропосферные концентрации  $\text{NO}_2$  в Минске за период 2019-2022 гг. не превышают среднегодовых значений ПДК  $\text{NO}_2$  (40  $\text{мкг/м}^3$ ), что показано на рисунке 2. Но если оценивать по данным ВОЗ, где среднегодовой ПДК составляет 10  $\text{мкг/м}^3$ , то превышение среднегодовой концентрации  $\text{NO}_2$  г. Минска от ПДК (ВОЗ) отличается в 2 раза.

Исследование распределения концентрации  $\text{NO}_2$  показало, что изолинии относительно высоких концентраций  $\text{NO}_2$  для г. Минска расположены за пределами границ города на расстояние до 15-20 км от МКАДа. По временной динамике концентраций  $\text{NO}_2$  в г. Минске 2020 год имеет меньшие величины острова загрязнения в центре города (на 2  $\text{мкг/м}^3$  меньше), что можно видеть на рисунке 2, что может быть связано с событием пандемии COVID-19 в данный период.



**Рисунок 2** – Среднегодовые значения тропосферных концентраций  $\text{NO}_2$  по данным Sentinel 5P и температуры земной поверхности по данным MODIS для территории г. Минска за период 2019-2022 гг.

Если выделять ГОЗ при помощи изолиний равных концентраций  $\text{NO}_2$  как максимальную замкнутую его часть, то он расположен в основном над центром города с некоторым смещением к юго-востоку. Указанное смещение может объясняться преобладанием северо-западных ветров в г. Минске, а также высокой плотностью промышленных территорий на юго-востоке города.

При сопоставлении среднегодовых концентраций  $\text{NO}_2$ , как индикатора ГОЗ, и температуры земной поверхности, как индикатора ГОТ, можно заметить, что указанные явления имеют общие тенденции развития в рамках границ г. Минска и взаимосвязаны друг с другом, так как среднегодовые максимальные значения поверхностных температур в городе совпадают с изолиниями максимальных значений концентраций  $\text{NO}_2$ .

**Заключение.** Выявлены особенности сезонного хода тропосферных концентраций  $\text{NO}_2$  над г. Минском: максимум концентраций наблюдается осенью (сентябрь-октябрь) и зимой (февраль-март), а минимум – в летние месяцы. Среднегодовая многолетняя концентрация  $\text{NO}_2$  для г. Минска составляет  $21,6 \text{ мкг/м}^3$ , что в 2 раза превышает ПДК согласно новым нормам ВОЗ. Сравнительная оценка разницы значений концентраций  $\text{NO}_2$  между г. Минском и Березинским заповедником, который рассматривался для вычисления фоновых значений, показала, что над г. Минском концентрация  $\text{NO}_2$  увеличена в 1,5-3 раза в зависимости от сезона года. Превышение концентрации  $\text{NO}_2$  в г. Минске над среднегодовым ПДК (РБ) – нет, ПДК (ВОЗ) – в 2 раза. Среднесуточные превышения ПДК (по РБ)  $\text{NO}_2$  в г. Минске проявляются только в безветренную погоду, в основном в феврале-марте и сентябре-октябре. Остров загрязнения г. Минска в среднем распространяется до высоты 100-150 метров, имеет ширину с запада на восток 45-55 км и протяженность с севера на юг 40-45 км и может выходить за пределы границ



города на расстояние до 15-20 км от МКАДа. 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 воздушные загрязнения имеют тенденцию к накоплению в приземном слое. В зимний сезон наблюдается более высокие значения концентраций NO<sub>2</sub>, чем летом. В связи с этим зимний период (с ноября по март) является самым грязным с точки зрения качества воздуха в г. Минске. Учитывая тот факт, что связь между двумя островами существует, то определение связи городского острова тепла и загрязнения г. Минска еще предстоит в будущем.

### Список цитированных источников

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. Рейтинг стран по уровню смертности от экологических проблем [Электронный ресурс]: – URL: <https://nonews.co/directory/lists/countries/mortality-rate-pollution> – Дата доступа: 04.06.2023.
3. Heaviside C., Macintyre H. Vardoulakis S. The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment // *Curr. Envir. Health* - 2017, Rpt. № 4. - P. 296-305.
4. Oke T.R. City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.* 1973, 7, 769–779.
5. Оке Т.Р. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere*, 1976, n.14, p.268—277.
6. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983, 248 с.
7. Adarsh Rao A. Urban Heat Island: Its Effect on Environment / A. Adarsh Rao, T. Kara, J. Sinha // *TerraGreen*. – 2022. – Iss. 83. – P. 34-36.
8. Гольберг М.А. Климат Минска. Мн.: Выш. шк., 1976, 288 с.
9. Глазачева Г.И., Залыгина И.А., Курлович Т.А. Состояние атмосферного воздуха г. Минска и прилегающего района/ Г. И. Глазачева, И. А. Залыгина, Т. А. Курлович // *Новости науки и технологий*. – 2011. - №1(18). – С. 3-10.
10. Czarnecka M., Nidzgorska-Lencewicz J. Intensity of urban heat island and air quality in Gdańsk during 2010 heat wave/ M. Czarnecka, J. Nidzgorska-Lencewicz // *Polish J. Environ. Stud.* – 2014. – 23. – P. 329–340.
11. Vîrghileanu M. Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak/ M. Vîrghileanu, I. Săvulescu, B.-A. Mihai, C. Nistor, R. Dobre// *Remote Sens.* - 2020. – 12 (21). – P. 3575. <https://doi.org/10.3390/rs12213575>.
12. Musco F. Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario / F. Musco. – Venezia: University of Venice. - 2016. – 400 p.
13. MODIS Database [Электронный ресурс]: – URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>– Дата доступа: 04.05.2023.



14. European Space Agency / Sentinel online [Электронный ресурс]: – URL: <https://sentinels.copernicus.eu/> – Дата доступа: 04.06.2023.
15. Gorelick N. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone/ N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Iyushchenko, D. Thau, R. Moore// Remote Sens. Environ. – 2017. – 202. – P. 18–27.
16. Google Earth Engine [Электронный ресурс]: – URL: <https://code.earthengine.google.com/> – Дата доступа: 04.06.2023.
17. Google Earth Engine Datasets [Электронный ресурс]: – URL: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets> – Дата доступа: 04.06.2023.
18. Бручковский И.И. Восстановление вертикального профиля концентрации тропосферной двуокиси азота по результатам измерений в Минске / И.И. Бручковский // Журнал БГУ. Физика. – 2020. – №1. – С. 95-104.
19. Гигиенические нормативы 05.03.2021, 5/48783 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) микроорганизмов в атмосферном воздухе населенных мест», утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь 25 января 2021 г. № 37.
20. WHO [Электронный ресурс]: – URL: [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/WHO-Air-Quality-Guidelines?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/WHO-Air-Quality-Guidelines?language=en_US) – Дата доступа: 04.06.2023.
21. Загрязнение воздуха Беларуси. Исследование из Космоса. Под ред. Ян Лабоги. Прага-Минск. - 2020. - 32 с.