

**І. В. БОДАК<sup>1</sup>, К. В. ДЯДЕЧКО<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
майдан Свободи, 6, м. Харків, Україна 61022

e-mail: [innabodak@ukr.net](mailto:innabodak@ukr.net)  
[dyadechko.ksyu31@gmail.com](mailto:dyadechko.ksyu31@gmail.com)

ORCID ID : <https://orcid.org/0000-0002-5799-1779>

## ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ВАРІАЦІЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М. ХАРКІВ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ ПИЛОМ ФРАКЦІЇ PM<sub>2,5</sub>

**Мета.** Виявлення просторових і часових варіацій забруднення атмосферного повітря урбогеосистем з високим ступенем антропогенного навантаження дрібнодисперсним пилом фракції PM<sub>2,5</sub> (на прикладі м. Харків).

**Методи.** Відкрита платформа онлайн-моніторингу «Air Pollution», вимірювання PM<sub>2,5</sub> здійснювалося пилόμεрами «7bit Pollution Monitor», статистичні.

**Результати.** Моніторинг PM<sub>2,5</sub> в атмосферному повітрі м. Харкова проводився у період з 01.08.2019 до 01.04.2020 на 6 контрольних точках у різних районах міста. Було опрацьовано 28119 проб. Джерелом отримання даних щодо масової концентрації PM<sub>2,5</sub> у повітрі слугувала відкрита платформа онлайн-моніторингу «Air Pollution». Для визначення дотримання гігієнічних норм вмісту дрібнодисперсного пилу фракції менше 2,5 мкм були використані порогові концентрації, рекомендовані ВООЗ. Оцінка рівня запиленості повітря та його небезпеки для здоров'я населення проводилася відповідно до міжнародної шкали рівня забруднення повітря PM<sub>2,5</sub> за Індексом якості повітря (Air Quality Index, AQI). Із загального обсягу досліджуваної вибірки для 17,4% випадків (4905 із 28119 значень масової концентрації PM<sub>2,5</sub>) зафіксовано перевищення ГДК за ВООЗ. Загалом відповідно до шкали AQI, у переважній кількості випадків вміст PM<sub>2,5</sub> в повітрі варіюється від низького до помірного. Найвищий рівень запиленості повітря характерний для точки №1 (Аптекаський провулок, 9), що може бути обумовлено її розташуванням на територіях із високою інтенсивністю руху автотранспорту. У ході аналізу простежено добову, тижневу та сезонну динаміку вмісту PM<sub>2,5</sub>. Сезонні та добові варіації вмісту PM<sub>2,5</sub> у повітрі м. Харкова залежать від зміни погодних умов (кількості опадів, швидкості вітру та ін.), рівня завантаженості автомобільних доріг і режиму роботи потенційних стаціонарних джерел забруднення.

**Висновки.** Отримані результати дають основу для подальшого дослідження кореляції вмісту PM<sub>2,5</sub> у повітрі зі ступенем впливу різних природних і соціально-економічних факторів території, а також із рівнем захворюваності населення.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** дрібнодисперсний пил, PM<sub>2,5</sub>, AQI, забруднення повітря, урбанізована територія, просторово-часова варіація

**Bodak I. V.<sup>1</sup>, Dyadechko K. V.<sup>1</sup>**

*V. N. Karazin Kharkiv National University, Svoboda Square, 6, Kharkiv, 61022, Ukraine*

### SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF PM<sub>2,5</sub> AIR POLLUTION LEVEL IN KHARKIV CITY

**Purpose** of the study is to determine spatial and temporal variability of PM<sub>2,5</sub> air pollution level within urban geosystems with a high anthropogenic pressure (on the example of Kharkiv city).

**Methods.** Open online monitoring platform «Air Pollution», PM<sub>2,5</sub> level was measured with «7bit Pollution Monitor», statistical.

**Results.** Monitoring of PM<sub>2,5</sub> air pollution of Kharkiv was conducted from August 1, 2019 to April 1, 2020 at 6 control points in different districts of the city. Air Pollution open online monitoring platform served as a data source of 28,119 mass concentrations of PM<sub>2,5</sub> in the air. Threshold concentrations, recommended by the WHO, were used to determine compliance with hygienic standards for fine dust of less than 2.5 μm. The PM<sub>2,5</sub> air pollution level and its degree of threat to public health were assessed in accordance with the International Air Quality Index (AQI) scale. Fine particles pose the greatest health risk. Exceeding the PM<sub>2,5</sub> threshold level set by the WHO was detected for 17.4% of studied cases (4,905 out of 28,119 studied cases). In general, according to

the AQI scale, in the vast majority of cases, the content of  $PM_{2.5}$  in the air varies from low to moderate. The highest level of  $PM_{2.5}$  in the air was measured at point No. 1 at the address Aptekarskyi Lane 9, which may be due to its location in areas with high traffic. The daily, weekly and seasonal variability of  $PM_{2.5}$  content was determined. Seasonal and daily variations in the content  $PM_{2.5}$  of in the air of Kharkiv depend on changes in weather conditions (precipitation, wind speed, etc.), the level of traffic congestion and the operation mode of potential stationary pollution sources.

**Conclusions.** The obtained results provide a basis for further study of the correlation of  $PM_{2.5}$  content in the air with the influence of various natural and socio-economic factors of the territory, as well as with the mortality rates.

**KEYWORDS:** particulate matter,  $PM_{2.5}$ , AQI, air pollution, urban area, spatial and temporal variability

**Бодак И. В.<sup>1</sup>, Дядечко К. В.<sup>1</sup>**

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, площадь Свободы, 6, г. Харьков, 61022, Украина*

### **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ВАРИАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА г. ХАРЬКОВ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛЬЮ ФРАКЦИИ $PM_{2.5}$**

**Цель.** Выявление пространственных и временных вариаций загрязнения атмосферного воздуха урбогеосистем с высокой степенью антропогенной нагрузки мелкодисперсной пылью фракции  $PM_{2.5}$  (на примере г. Харьков).

**Методы.** Открытая платформа онлайн-мониторинга «Air Pollution», измерение  $PM_{2.5}$  осуществлялось пылемерами «7bit Pollution Monitor», статистические.

**Результаты.** Мониторинг  $PM_{2.5}$  в атмосферном воздухе г. Харькова проводился в период с 01.08.2019 до 01.04.2020 на 6 контрольных точках в разных районах города. Было обработано 28119 проб. Источником получения данных о массовой концентрации  $PM_{2.5}$  в воздухе служила открытая платформа онлайн-мониторинга «Air Pollution». Для определения соблюдения гигиенических норм содержания мелкодисперсной пыли фракции менее 2,5 мкм были использованы пороговые концентрации, рекомендованные ВОЗ. Оценка уровня запыленности воздуха и его опасности для здоровья населения проводилась в соответствии с международной шкалой уровня загрязнения воздуха  $PM_{2.5}$  по Индексу качества воздуха (Air Quality Index, AQI). С общего объема исследуемой выборки для 17,4% случаев (4905 из 28119 значений массовой концентрации  $PM_{2.5}$ ) было зафиксировано превышение ПДК за ВОЗ. В общем в соответствии со шкалой AQI, в подавляющем числе случаев содержание  $PM_{2.5}$  в воздухе варьируется от низкого до умеренного. Самый высокий уровень запыленности воздуха характерен для точки №1 (Аптекарский переулок, 9), что может быть обусловлено ее расположением на территории с высокой интенсивностью движения автотранспорта. В ходе анализа была прослежена суточная, недельная и сезонная динамика содержания  $PM_{2.5}$ . Сезонные и суточные вариации содержания  $PM_{2.5}$  в воздухе Харькова зависят от изменения погодных условий (количества осадков, скорости ветра и др.), уровня загруженности автомобильных дорог и режима работы потенциальных стационарных источников загрязнения.

**Выводы.** Полученные результаты дают основу для дальнейшего исследования корреляции содержания  $PM_{2.5}$  в воздухе со степенью влияния различных природных и социально-экономических факторов территории, а также с уровнем заболеваемости населения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** мелкодисперсная пыль,  $PM_{2.5}$ , AQI, загрязнение воздуха, урбанизированная территория, пространственно-временная вариация

### **Вступ**

В умовах інтенсивного антропогенного пресингу забруднення атмосферного повітря залишається серед пріоритетних екологічних проблем, які становлять загрозу для здоров'я людей та живої природи в цілому. Особливо це актуально для урбанізованих територій, де зосереджена переважна більшість стаціонарних та пересувних джерел забруднення атмосфери.

До урбогеосистем з високим ступенем техногенного навантаження на атмосферне повітря слід віднести і територію м. Харкова, яке є одним і найбільших промислових центрів України. Так, у 2018 р. обсяги вики-

дів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел у Харкові становили 4800,2 т., при цьому їхня щільність сягала 13714,7 кг/км<sup>2</sup> [1]. За узагальненими даними 2016–2018 рр., у перерахунку на 1 особу щороку у повітря м. Харків надходить 3,3–3,4 кг викидів від стаціонарних джерел [1]. Загалом Індекс забруднення атмосфери міста (ІЗА) у 2018 році дорівнював 4,09 [2], що за шкалою відповідає слабкому рівню забруднення.

Однією з пріоритетних забруднюючих речовин у компонентному складі викидів стаціонарних джерел Харкова є пил, на який

станом на 2018 р. припадало 10,7 % (511, 2 т) від загального обсягу [1]. За даними Харківського регіонального центру з гідрометеорології, зібраних на базі 10 стаціонарних пунктів спостереження, обладнаних комплектами лабораторіями, «ПОСТ-1» та «ПОСТ-2», у 2018 р. середньорічний рівень запиленості повітря міста становив  $0,09 \text{ мг/м}^3$  (0,6 ГДКс.д.) [2]. Станом на березень 2020 р. концентрації пилу в повітрі м. Харків коливалися від  $0,03$  до  $0,11 \text{ мг/м}^3$  [3] і не перевищували середньодобове ГДК ( $0,15 \text{ мг/м}^3$ ) згідно з ДСП-201-97 [4].

На додачу до стаціонарних джерел значний внесок у підвищення рівня запиленості атмосфери Харкова вносять пересувні джерела забруднення, зокрема автотранспорт. Забруднення повітря викидами автотранспорту займає друге місце після енергетики за рахунок постійного збільшення кількості машин. Окрім надходження токсичних газів, обсяг і склад яких буде залежати від технічного стану автомобіля, типу і потужності двигуна, режиму його роботи, якості палива, характеру транспортного потоку, стану дорожнього покриття та ін., рух транспорту супроводжується підвищенням рівнів вторинного здійснення пилу [2].

Через високу турбулентність повітряних потоків, спричинену пересуванням транспорту по дорогах, у повітря прилеглих територій здійснюються пилові частинки різних фракцій, які утворюються в результаті стирання дорожнього покриття, гальмівних колодок і шин автомобілів, а також викидів вихлопних систем. Як зазначають Слободянюк А.О. та ін. [5], хімічний склад та обсяг пилу багато в чому залежить від характеру дорожнього покриття. Для доріг із гравію характерний пил з переважаючим вмістом діоксиду кремнію, тоді як на дорогах з асфальтобетонним покриттям пил додатково міститиме продукти зношування в'язучих бітумовмісних матеріалів та фарби ліній розмітки дороги.

Пил є одним із найбільш поширених несприятливих факторів забруднення атмосферного повітря. При цьому, як акцентує Неменко Б. А. [6], велику роль відіграє дисперсність пилових частинок, від якої залежить тривалість їх перебування у повітрі, глибина проникнення у дихальні шляхи та затримка в різних ділянках дихального тракту. Так, крупні частинки пилу діаметром 10–

100 мкм, затримуються у верхніх дихальних шляхах, а дрібні (до 5 мкм) здатні глибоко проникати в дихальні шляхи, справляючи патологічний вплив на дихальну систему, викликаючи алергічні реакції [6; 7; 8; 9; 10] та будучи опосередкованим джерелом парникових газів [7]. Враховуючи особливу загрозу дрібнодисперсного пилу для здоров'я населення, у центрі даної наукової розвідки знаходяться саме зважені частинки із розміром фракції менше 2,5 мкм (далі –  $\text{PM}_{2,5}$ ).

Згідно з ДСП-201-97 [4] пил належить до 3 класу небезпеки, проте у складі пилу урбанізованих територій можуть знаходитися токсичні хімічні елементи [6; 7; 8]. Дрібнодисперсні фракції пилу можуть перебувати в атмосфері протягом багатьох днів і переноситися на великі відстані, тому фізичні та хімічні характеристики завислих частинок змінюються залежно від місцезнаходження [8]. Серед найбільш поширених хімічних компонентів  $\text{PM}_{2,5}$  слід назвати сульфати, нітрати, аміак, інші неорганічні йони (іони натрію, калію, кальцію, магнію, хлору), а також органічний і елементарний вуглець, зв'язана вода, метали (у тому числі V, Cd, Cu, Ni, Zn) і поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), в тому числі бенз(а)пірен [7; 8; 9]. У складі  $\text{PM}_{2,5}$  зустрічаються і біокомпоненти, зокрема алергени і мікроорганізми [8].

Підвищені концентрації  $\text{PM}_{2,5}$  призводять до легеневих дисфункцій, хронічного пригнічення темпів розвитку легень, довготривалої легеневої недостатності, раку легень, викликають астму та алергічні реакції, загострюють серцево-судинні захворювання [8]. Загалом у глобальному масштабі на рахунок впливу  $\text{PM}_{2,5}$  відносять приблизно 3% випадків смертей від захворювань серцево-судинної і дихальної систем і 5% випадків смерті від раку легень [6; 8].

Питанню забруднення атмосферного повітря м. Харків різного роду поллютантами, у тому числі й пилом, присвячено цілу низку робіт [12–15]. Зокрема, у роботі [12] представлено оцінку ризиків розвитку канцерогенних і неканцерогенних ефектів від забруднення повітря промислово розвинених регіонів, серед яких і м. Харків. У роботі [13] було зроблено оцінку якості повітря м. Харків за 2010–2015 рр. та визначено, що основними забруднювачами атмосфери міста (понад 70% вкладу) є формальдегід, вуглецю оксид, діоксид азоту, пил і фенол. При цьому автори вважають, що для поліпшення

якості атмосферного повітря в місті пріоритетними слід вважати комплекс заходів щодо зниження викидів від автотранспорту як основного джерела забруднення атмосфери. Негативний вплив автотранспорту на якість повітря м. Харків проілюстровано і в роботі [14], авторами якої було виявлено перевищення ГДК для оксиду вуглецю, діоксиду азоту та пилу в атмосферному повітрі міста Харкова в районах автостанцій.

Дослідженню просторового розподілу пилового забруднення атмосферного повітря м. Харків присвячена робота [15]. Проте, в полі зору авторів знаходиться загальний вміст пилу у повітрі без розподілу його на фракції, тоді як особливу небезпеку для здоров'я несе саме дрібнодисперсний пил. Низка дослідників, зокрема Пономарьова С. Д. [7]

та Слободянюк А. О. та ін. [5], зазначають, що оскільки в Україні дослідження забруднення повітря дрібнодисперсними фракціями пилу, у тому числі й  $PM_{2,5}$ , знаходиться на початковій стадії, існує нагальна потреба у вивченні джерел надходження дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря, визначенні його характеристик та пошуку можливих шляхів зменшення їх концентрацій до екологічно безпечних.

Враховуючи актуальність розвитку моніторингу запиленості урбанізованих територій, **метою** дослідження є виявлення просторових і часових варіацій забруднення атмосферного повітря урбогеосистем з високим ступенем антропогенного навантаження, дрібнодисперсним пилом фракції  $PM_{2,5}$  (на прикладі м. Харків).

### Об'єкти та методи дослідження

Для дослідження просторово-часової варіації вмісту дрібнодисперсного пилу в приземному шарі повітря м. Харків обрано 6 контрольних точок в різних адміністрати-

вних районах міста (табл. 1) з різним характером антропогенного навантаження (житлові забудови, промислові зони, суспільно-ділові зони).

Таблиця 1

Точки моніторингу масової концентрації дрібнодисперсного пилу фракції  $PM_{2,5}$  у приземному шарі повітря м. Харків

Номер точки	Адреса
1	Аптекарьський провулок, 9
2	вул. Білецького, 21
3	вул. Героїв праці, 68Б
4	вул. Доватора, 17
5	вул. Селянська, 25
6	Ново-Баварський проспект, 107

Дослідження ґрунтувалися на аналізі даних щодо масової концентрації дрібнодисперсного пилу фракції  $PM_{2,5}$  за період з 01.08.2019 р. до 01.04.2020 р. (8 місяців). Джерелом отримання даних слугував відкритий електронний ресурс Air Pollution [11].

Вимірювання концентрації пилу фракції  $PM_{2,5}$  здійснювалося за допомогою пиломірів «7bit Pollution Monitor» розробки О. Кузьмюка («Distributed Data System Ltd», м. Дніпро). Ці пристрої слугують для побудови мережі збору даних в рамках системи громадського моніторингу забруднення повітря з метою ідентифікації джерел та масштабів пилового забруднення [11]. Принцип вимірювання пилу у приземному шарі повітря полягає у фіксації масової концент-

рації  $PM_{2,5}$  кожні 2 хвилини з подальшим розрахунком середнього значення за годину та передачею даних по Інтернет-каналі зв'язку Wi-Fi в автоматичну систему моніторингу. Загалом опрацьована вибірка даних із 28119 значень масової концентрації  $PM_{2,5}$  протягом досліджуваного періоду.

Під час здійснення гігієнічної оцінки вмісту пилу в повітрі до уваги взято як національні, так і міжнародні підходи до нормування запилення повітря. Співставлення існуючих на сьогодні нормативних вимог до вмісту завислих речовин у повітрі подано в таблиці 2.

Зазначимо, що в Україні встановлені гігієнічні норми лише щодо загального вмісту завислих речовин у повітрі (TSP). Сюди

Таблиця 2

Гранично допустимі концентрації  $PM_{2,5}$  в атмосферному повітрі

Забруднююча речовина	Час усереднення	Гранично допустима (порогова) концентрація, $мкг/м^3$		
		ЄС [16]	ВООЗ [17]	Україна [4]
Завислі речовини, загальний вміст (TSP)	20 хвилин	-	-	500
	24 години	-	-	150
Завислі речовини розміром <10 $мкм$ ( $PM_{10}$ )	24 години	50	50	
	рік	40	20	
Завислі речовини розміром <2,5 $мкм$ ( $PM_{2,5}$ )	24 години	-	25	
	рік	20	10	

відносять усю сукупність завислих частинок розміром до 500  $мкм$  без розподілу їх на фракції, що значно ускладнює процес моніторингу забруднення повітря дрібнодисперсним пилом. У той час, як у США та країнах Європейського Союзу вже давно існує фракційне нормування пилу ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_1$ ), підкріплене низкою систематичних досліджень та методичних розробок. Особливу увагу гігієнічному нормуванню пилу в повітрі приділяє ВООЗ, встановлюючи найбільш жорсткі вимоги. Враховуючи сказане вище, у рамках даних досліджень використано гігієнічні нормативи, запропоновані ВООЗ, а саме середньодобова ( $ГДК_{с,д} = 25 \text{ мкг}/м^3$ ) та

середньорічна ( $ГДК_{с,р} = 10 \text{ мкг}/м^3$ ) гранично допустимі концентрації.

Рівень забруднення повітря  $PM_{2,5}$  визначався відповідно до міжнародної шкали ризику для здоров'я населення за Індексом якості повітря (Air Quality Index, AQI), запропонованої Європейським агентством з охорони довкілля (European Environment Agency, EEA) (табл. 3).

Загалом Індекс якості повітря враховує концентрації таких речовин, як озон ( $O_3$ ), діоксид сірки ( $SO_2$ ), діоксид азоту ( $NO_2$ ) та дрібнодисперсні тверді частинки  $PM_{10}$  та  $PM_{2,5}$ . [18].

Таблиця 3

Шкала рівня забруднення повітря дрібнодисперсним пилом фракції  $PM_{2,5}$  [18]

Завислі частинки розміром <2,5 $мкм$ ( $PM_{2,5}$ ), $мкг/м^3$	Рівень забруднення повітря / ризик для здоров'я населення
1-10	Низький (Good)
10-20	Задовільний (Fair)
20-25	Помірний (Moderate)
25-50	Високий (Poor)
50-75	Дуже високий (Very poor)
75-800	Небезпечний (Extremely poor)

Результати та обговорення

Моніторинг пилового забруднення м. Харків передбачав дві цілі: виявлення територіальної диференціації вмісту  $PM_{2,5}$  у приземному шарі повітря залежно від характеру антропогенного навантаження території та простеження часової варіації концентрацій  $PM_{2,5}$  залежно від часу доби, місця та сезону.

Аналіз рис. 1 показує, що середні місячні концентрації  $PM_{2,5}$  варіюються від 0,08  $ГДК_{с,д}$  за ВООЗ (грудень, точка №3 по вул. Героїв Праці, 68Б) до 1,05  $ГДК_{с,д}$  (грудень, точка №1 на пров. Аптекарьському, 9). Для більшості точок (точки №2, 4, 5, 6) най-

вищі середні концентрації  $PM_{2,5}$  характерні в період з січня (23,1–24,5  $мкг/м^3$ ) по березень (17,8–24,5  $мкг/м^3$ ).

Простежуючи просторову варіацію запиленості атмосферного повітря по точках, відзначимо, що найменші концентрації  $PM_{2,5}$  (2–11  $мкг/м^3$ ) зафіксовані у точці №3 (вул. Героїв праці, 68Б), а найвищі (16,9 – 26,3  $мкг/м^3$ ) – у точці №1 (пров. Аптекарьський, 9). Цю тенденцію підтверджено і за розрахованими значеннями середніх концентрацій  $PM_{2,5}$  за весь період спостережень. Так, для точки №1 середні річні концентрації  $PM_{2,5}$  становлять 2,18  $ГДК_{с,р}$  за ВООЗ, а

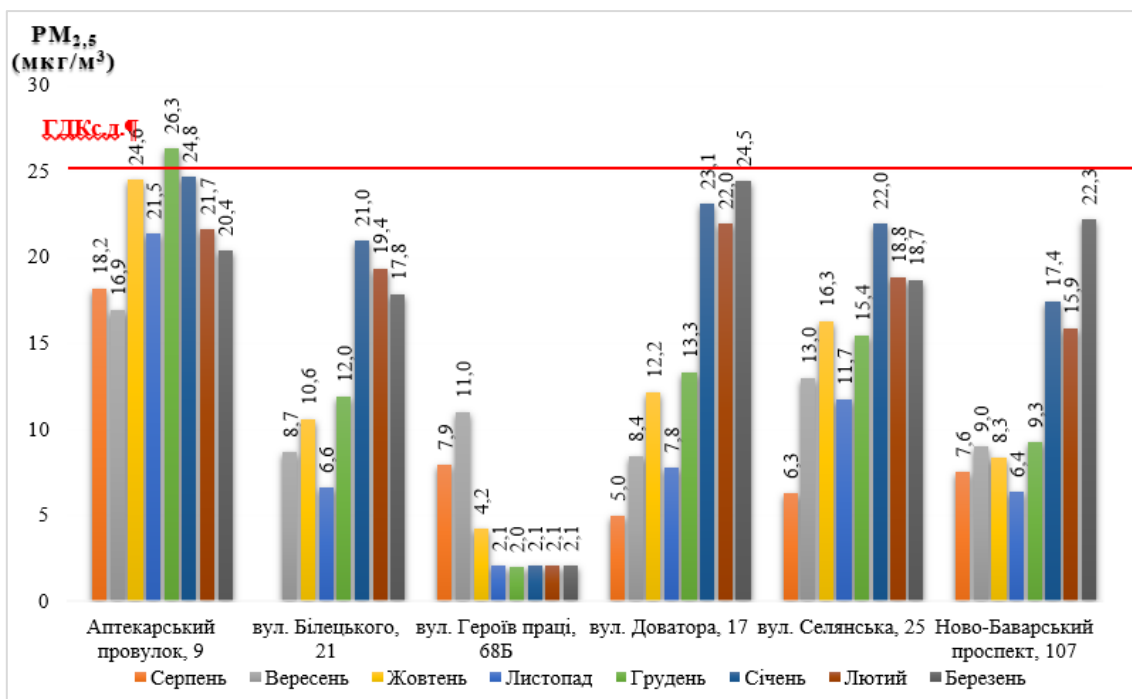


Рис. 1 – Середні місячні концентрації  $PM_{2,5}$  у повітрі м. Харків за період спостереження

для точки №2 – 0,42 ГДК<sub>с.р.</sub>. Зазначимо, що точка №2 розташована в спальному районі міста, де відсутні промислові підприємства. Тоді як точка №1 розташована близько до центру міста, і в радіусі 500 м від неї знаходяться ринок, залізнична станція «Харків-Левада», автостанції №3 та №1. Отже, інтенсивність руху автотранспорту, який є одним із основних потенційних джерел забруднення повітря, тут дуже висока.

Зазначимо, що схема забудови центральної частини Харкова створена за радіальним принципом і не розрахована на сучасний рівень транспортного потоку. Через центральні райони міста рухається велика кількість автомобілів, при чому з малою швидкістю та великою кількістю зупинок, що призводить до надмірного витрачання пального і є причиною високого рівня загазованості повітря [2]. Як зазначає Невмержицький М. В. [9], при поєднанні несприятливих метеорологічних, транспортних і містобудівних умов в межах міста може сформуватися екстремально високий рівень забруднення повітря небезпечними поллютантами, які виділяються з відпрацьованими газами автомобілів. Це, в свою чергу, чинить надзвичайно небезпечний вплив на населення та навколишнє середовище. На додачу до невідпрацьованих режимів швидкості дорожнього руху серед факторів, які обумовлюють високий внесок автотранспорту у забруднення повітря м. Харків,

слід назвати експлуатацію технічно застарілого автопарку та поганий (місцями навіть аварійний) стан дорожнього покриття.

Зауважимо, що саме для точки №1 (Аптекарьський провулок, 9) зафіксована найбільша кількість випадків перевищення ГДК, а саме 36% від загальної кількості відібраних проб у цій точці; а найменша (1%) – для точки №3 (вул. Героїв праці, 68Б). Загалом за весь період спостережень перевищення середньодобових ГДК виявлені в усіх точках відбору проб, про що свідчать дані таблиці 4.

За результатами проведеної оцінки якості повітря м. Харків на основі розрахованих значень середніх місячних концентрацій  $PM_{2,5}$  відповідно до шкали AQI (див. табл. 3) виявлено, що у 38,3% (18 із 47) випадків вміст дрібнодисперсного пилу  $PM_{2,5}$  в повітрі є низький, у 31,9% (15 із 47) – задовільний, у 27,7% (13 із 47) – помірний, і тільки в 2,13% випадків – високий.

Часова варіація розрахованих середніх значень масових концентрацій  $PM_{2,5}$  за весь період спостережень (рис 2), свідчить про зростання вмісту пилу в повітрі від серпня до березня. При цьому лише у серпні та листопаді середньомісячні концентрації  $PM_{2,5}$  не перевищували пороговий рівень, тоді як для інших місяців зафіксовано перевищення нормативу від 1,1 (вересень) до 1,8 ГДК<sub>с.р.</sub> (січень). Сезонні зміни, відображені на рис. 3, теж показують збільшення середніх

Таблиця 4

Випадки перевищення ГДК  $PM_{2,5}$  у пробах повітря м. Харків за весь період спостережень

№ точки	Адреса	Всього	Перевищення ГДК <sub>с.д.</sub>	У межах ГДК <sub>с.д.</sub>
1	Аптекарьський провулок, 9	5412	1964	3448
2	вул. Білецького, 21	4628	773	3855
3	вул. Героїв праці, 68Б	5227	48	5179
4	вул. Доватора, 17	4841	970	3871
5	вул. Селянська, 25	3924	710	3214
6	Ново-Баварський проспект, 107	4087	440	3647

концентрацій  $PM_{2,5}$ , від літа ( $9,0 \text{ мкг/м}^3$ ) до весни ( $17,6 \text{ мкг/м}^3$ ) майже у 2 рази.

Дійсно, влітку середнє значення концентрації  $PM_{2,5}$  повітрі становило  $9 \text{ мкг/м}^3$ , а навесні –  $17,6 \text{ мкг/м}^3$ , тобто майже вдвічі більше. При цьому найбільший відсоток проб з перевищенням ГДК припадає на зимовий період (60%) (рис. 4). Узагальнена інформація щодо випадків перевищення нормативного вмісту  $PM_{2,5}$  у повітрі в 6 контрольних точках у межах м. Харків за кожен місяць спостережень представлена у табл. 5.

Низьку запиленість повітря у літній період можна пояснити тим, що у Харкові, як і в усьому помірному поясі, саме в літні місяці випадає найбільша кількість опадів. У той час, як з лютого по квітень припадає найбільш посушливий період. Зростання концентрацій  $PM_{2,5}$  у зимово-весняний період порівняно з літнім також може бути посилено аномальністю цього річного погодних умов, яка проявляється у підвищенні температури повітря та зниженні кількості

опадів. До прикладу, березень 2020 р. видався аномально посушливим і теплим. Так, середня місячна температура повітря становила  $+6,5 \text{ }^\circ\text{C}$  [19], що вище за норму на  $5,8^\circ$  (середня температура повітря для березня у м. Харків становить  $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$  [20]). У березні 2020 р. у м. Харків випало лише 18 мм опадів [19], тобто 55% від норми в 33 мм [20]. Досить цікавим аспектом є простеження тижневої та добової динаміки рівня запиленості повітря. Серед факторів, які потенційно можуть впливати на зміну пилу в повітрі у різні дні тижня, є звантаженисть автомобільних доріг та графік роботи підприємств, адже вони визначають інтенсивність надходження аерозолів у атмосферне повітря.

За результатами досліджень, реалізованих на прикладі вибірки даних щодо концентрацій  $PM_{2,5}$  у повітрі у точці №1 (пров. Аптекарьський, 9) протягом вересня 2019 року, виявлено, що найменші концентрації  $PM_{2,5}$  у повітрі характерні у вихідні дні – суботу та неділю ( $13,5\text{--}16,2 \text{ мкг/м}^3$ ), найвищі –

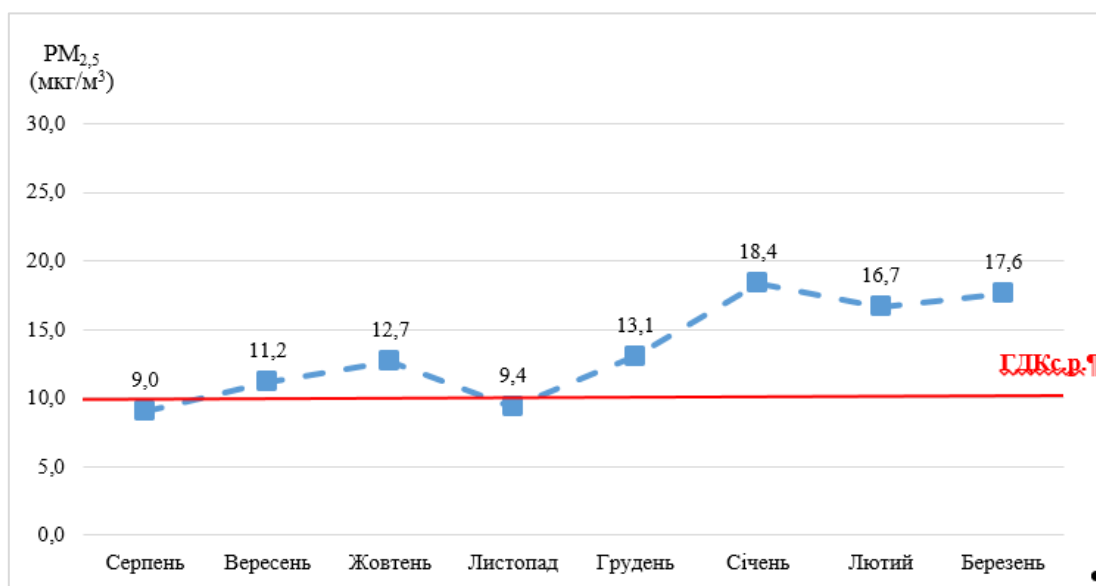


Рис. 2 – Узагальнені середні значення концентрацій  $PM_{2,5}$  для кожного місяця спостереження



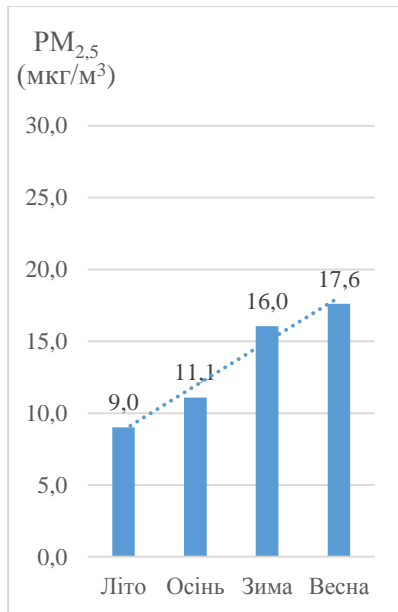


Рис. 3 – Сезонна динаміка  $PM_{2,5}$

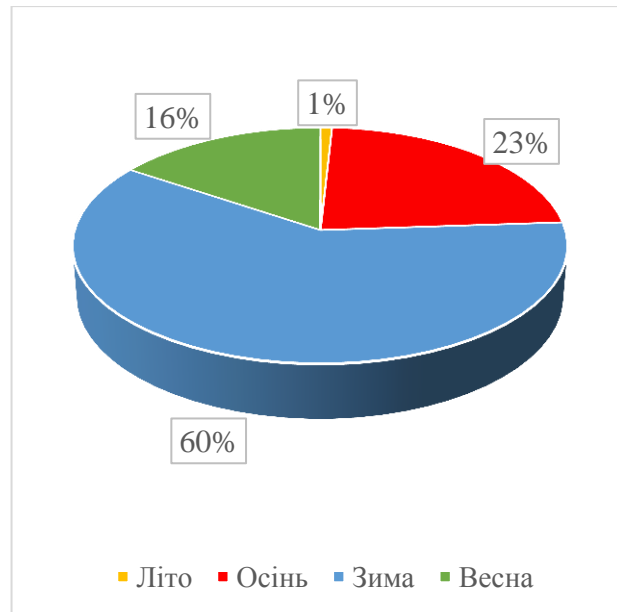


Рис. 4 – Випадки перевищення ГДК  $PM_{2,5}$  у різні сезони року (%)

Таблиця 5

**Випадки перевищення нормативу за вмістом  $PM_{2,5}$  у повітрі м. Харків за кожний місяць спостережень**

Місяць	Аптека́рський провулок, 9 (т. №1)	вул. Білецького, 21 (т. №2)	вул. Героїв праці, 68Б (т. №3)	вул. Доватора, 17 (т. №4)	вул. Селянська, 25 (т. №5)	Ново-Баварський проспект, 107 (т. №6)
Серпень	37		4		1	
Вересень	154	6	39	4	50	8
Жовтень	340	19	5	82	109	15
Листопад	263	3		8	22	5
Грудень	361	61		117	80	45
Січень	372	293		337	228	97
Лютий	267	229		241	125	113
Березень	170	162		181	95	157

четвер (19,5–24,4 мкг/м<sup>3</sup>). Добова динаміка вмісту  $PM_{2,5}$  у повітрі проілюстрована на прикладі графіка концентрацій  $PM_{2,5}$  у повітрі у точці №1 (пров. Аптека́рський, 9) станом на 07.09.2019 року (рис. 5).

Отримані результати, проілюстровані на рис. 5, свідчать, що концентрації  $PM_{2,5}$  у переважній кількості вимірювань найнижчі у період з 11:00 по 18:00 (4–9 мкг/м<sup>3</sup>), що припадає на час середньостатистичного робочого дня. Ці показники у 1,5– 3,4 разів нижчі за середню концентрацію за добу (13,5 мкг/м<sup>3</sup>).

Однак, враховуючи те, що рівень

вмісту пилу у повітрі є результатом впливу комплексу як природних (погодні умови, особливості переміщення повітряних мас, характер підстилаючої поверхні та ін.), так і соціально-економічних (інтенсивність руху автотранспорту, обсяг і склад викидів, режими функціонування промислових підприємств, особливості забудови території, рівень віддаленості від потенційного джерела забруднення та ін.), сезонні та добові особливості варіації  $PM_{2,5}$  у повітрі потребують більш детального вивчення і становлять собою подальшу перспективу даного дослідження.



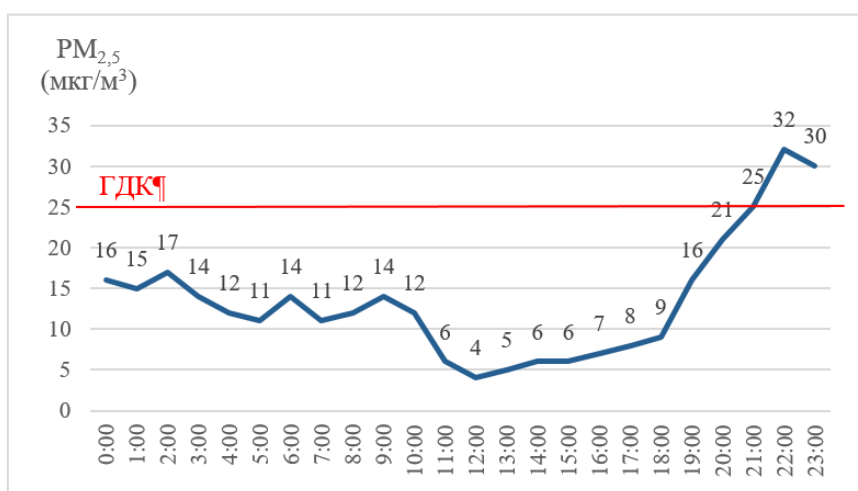


Рис. 5 – Добова динаміка концентрації PM<sub>2,5</sub> (на прикладі вибірки даних для точки №1 (Аптекаський провулок, 9) станом на 07.09.2019 року)

### Висновки

Висока потенційна загроза дрібнодисперсного пилу для здоров'я людини криється у його здатності легко проникати в організм людини через дихальні шляхи завдяки мікроскопічним розмірам. Будучи надзвичайно легким, дрібнодисперсний пил може досить тривалий час залишатися у повітрі у завислому стані, а отже переноситися на значні відстані від місця надходження. Внаслідок атмосферного перенесення пилу змінюються фізичні та хімічні характеристики пилових частинок, а отже, зростає їх потенційна небезпека.

Підвищений рівень PM<sub>2,5</sub> у повітрі може призводити до розвитку захворювань органів дихання та зростання ризику виникнення хвороб серцево-судинної системи. Тяжкість захворювань залежить від тривалості експозиції. Особливо вразливими є люди похилого віку та діти.

Дослідження забруднення атмосферного повітря м. Харків дрібнодисперсним пилом з розміром фракції менше 2,5 мм (PM<sub>2,5</sub>) проведені на базі даних платформи онлайн-моніторингу Air Pollution. На основі статистичних даних, зібраних авторами за період з 01.08.2019 р. до 01.04.2020 р. для 6

контрольних точок простежені просторово-часові варіації вмісту PM<sub>2,5</sub> у приземному шарі повітря.

Із вибірки обсягом у 28119 значень масових концентрацій PM<sub>2,5</sub> для 17,4% випадків (4905 із 28119) зафіксовано перевищення ГДК PM<sub>2,5</sub> за ВООЗ. Загалом відповідно до шкали AQI, у переважній кількості випадків вміст PM<sub>2,5</sub> в повітрі варіюється від низького до помірного. Найвищий рівень запиленості повітря характерний для точки №1 (Аптекаський провулок, 9), що може бути обумовлено близькістю її розташування до територій із високою інтенсивністю руху автотранспорту.

Сезонні та добові варіації вмісту PM<sub>2,5</sub> у повітрі м. Харків залежать від зміни погодних умов (кількості опадів, швидкості вітру та ін.), рівня завантаженості автомобільних доріг і режиму роботи потенційних стаціонарних джерел забруднення.

Подальша перспектива досліджень вбачається у виявленні кореляції вмісту PM<sub>2,5</sub> зі ступенем впливу різних природних і соціально-економічних факторів території, а також із рівнем захворюваності населення м. Харків.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

### Література

1. Навколишнє середовище Харківської області : статистичний збірник. Харків: Головне управління статистики у Харківській області, 2019. 57 с. URL : <http://kh.ukrstat.gov.ua/categories/1036-publikatsii-prezentatsiini-versii/ekonomichna-statystyka/ekonomichna-diialnist/navkolyshnie-seredovishche/3112-navkolishne-seredovishche> (дата звернення: 11.05.2020)
2. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Харківській області у 2018 році. Харків : Департамент екології та природних ресурсів Харківської обласної державної адміністрації, 2019. 153 с. URL : [https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1006/100511/ Attaches/regionalna\\_dopovid\\_2018.pdf](https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1006/100511/ Attaches/regionalna_dopovid_2018.pdf) (дата звернення: 11.05.2020)
3. Спостереження за забрудненням атмосферного повітря в м. Харкові. *Харківський регіональний центр з гідрометеорології : офіційний інформаційний сервер* : веб-сайт. URL: <http://kharkiv.meteo.gov.ua/monitoring/> (дата звернення : 04.04.2020)
4. ДСП-201-97. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) : затв. наказом МОЗ України від 9 липня 1997 р. № 201. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0201282-97> (дата звернення: 11.05.2020)
5. Слободянюк А. О., Гарсія Камачо Ернан Уліанодт, Сільва Рубіо Луїс Антоніо, Васильківський І. В. (2018). Дослідження аерозольного забруднення Вінниці. *Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 14-23 березня 2018 р.*. 2018. 5 с. URL : <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/22391> (дата звернення : 11.05.2020)
6. Неменко Б.А., Илиясова А.Д., Арынова Г.А. Оценка степени опасности мелкодисперсных пылевых частиц воздуха. *Вестник КазНМУ, №3(1)-2014*. 2014. С. 133–135. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-stepeni-opasnosti-melkodispersnyh-pylevyh-chastits-vozduha>
7. Пономарьова С. Д. Захист атмосферного повітря від забруднення викидами дрібнодисперсних органічних частинок кондитерських підприємств : дис. ... канд. техн. наук (доктора філософії) : 21.06.01 / Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем». Харків, 2019. 213 с.
8. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. Значение для разработки политики в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии. *Информационный бюллетень Европейского регионального бюро ВОЗ*. Копенгаген, 2013. 20 с. URL : [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0007/189052/Health-effects-of-particulate-matter-final-Rus.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0007/189052/Health-effects-of-particulate-matter-final-Rus.pdf?ua=1) (дата обращения: 11.05.2020)
9. Невмержицкий Н. В. Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM<sub>10</sub> и PM<sub>2.5</sub> : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.02. Санкт-Петербург, 2016. 154 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/metodika-otsenki-i-prognozirovaniya-ekstremalnogo-zagryazneniya-vozdukh-na-avtomagistralyak>
10. Стреляева А. Б., Лаврентьева Л. М., Лупиногин В. В., Гвоздков И. А. Исследования запыленности в жилой зоне, расположенной вблизи промышленных предприятий частицами PM<sub>10</sub> и PM<sub>2.5</sub>. *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 2. 8 с. URL : <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2017/4238> (дата обращения: 11.05.2020)
11. *Air Pollution*: веб-сайт. URL: <https://www.air-pollution.nl> (дата звернення: 01.04.2020)
12. Nekos A., Medvedeva Y., Cherkashyna N. Assessment of environmental risks from atmospheric air pollution in industrially developed regions of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geocology*, 28(3). 2019. P. 511–518. URL : <https://doi.org/10.15421/111947> (Last accessed: 2020-05-11)
13. Бекетов В. С., Свтухова Г. П., Ломакіна О. С. Аналіз та оцінка рівня забруднення атмосферного повітря м. Харків. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології, № 3-4(26)*. 2016. С. 97–103. URL: <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/7759>
14. Кулік М. І., Івах Ю. А. Оцінка якості атмосферного повітря на основних автостанціях м. Харків. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології. Вип 31*. 2019. С. 117–129. URL: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2019-31-11>
15. Lydina V. I., Maksymenko N. V., Cherkashyna N. I. Spatial distribution of air dust pollution in Kharkiv city. *Охорона довкілля: зб. наук. статей XV Всеукраїнських наукових Талійських читань*. Харків, 2019. С. 124–125.
16. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=en> (Last accessed: 2020-05-11)
17. WHO Air Quality Guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. Geneva : WHO, 2005. 22 p. URL: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_eng.pdf;jsessionid=464F804B47551ECF18AC385034A07DB3?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf;jsessionid=464F804B47551ECF18AC385034A07DB3?sequence=1) (Last accessed: 2020-05-11)
18. European Air Quality Index. GIS Map Application. *European Environment Agency* : web page. URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index> (Last accessed: 2020-05-11)
19. Архів погоди в Харкові (аеропорт). *Розклад погоди rp5.ua* : веб-сайт. URL: <https://rp5.ua/> (дата звернення: 11.05.2020)
20. Клімат Харкова. *Харківський регіональний центр з гідрометеорології : офіційний інформаційний сервер* : веб-сайт. URL: <http://kharkiv.meteo.gov.ua/klimat-kharkova/> (дата звернення : 11.05.2020)

## References

1. Environment of Kharkiv region: a statistics digest. (2019). Main Department of Statistics in Kharkiv Region. Retrieved from <http://kh.ukrstat.gov.ua/categories/1036-publikatsii-prezentatsiini-versii/ekonomichna-statystyka/ekonomichna-diialnist/navkolyshnie-seredovyshche/3112-navkolyshnie-seredovyshche> (in Ukrainian).
2. Report on the state of the environment in Kharkiv region in 2018. (2019). Department of Ecology and Natural Resources of the Kharkiv Regional State Administration, Kharkiv. Retrieved from [https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1006/100511/Attaches/regionalna\\_dopovid\\_2018.pdf](https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1006/100511/Attaches/regionalna_dopovid_2018.pdf) (in Ukrainian).
3. Monitoring of air pollution in Kharkiv. (2020). *Kharkiv Regional Center for Hydrometeorology: official information server: website*. Retrieved from <http://kharkiv.meteo.gov.ua/monitoring/> (in Ukrainian).
4. DSP-201-97. (1997). State sanitary regulations for protection of atmospheric air of settlement areas (from pollution with chemical and biological substances): adopted by the Order of the Ministry of Health of Ukraine dated on July 9, 1997 No. 201. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0201282-97> (in Ukrainian).
5. Slobodianyuk, A. A., Garcia Camacho Herman Ullianodt, Silva Rubio Luis Antonio & Vasylykivskiy, I. V. (2018). Investigation of aerosol pollution of Vinnytsia. *Proceedings of the XLVII Scientific and Technical Conference of VNTU departments*, Vinnytsia, 2018, March 14-23, (pp.1-5). Vinnytsia, Vinnytsia National Technical University. Retrieved from <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/22391> (in Ukrainian).
6. Nemenko, B. A., Ilyasova, A. D. & Arynova, G. A. (2014). Estimation of the danger degree of fine dust particles in the air. *Bulletin of KazNMU*, (3-1), 133–135. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-stepeni-opasnosti-melkкодисперсных-pylevyh-chastits-vozduha> (in Russian).
7. Ponomarova, S. D. (2019). Protection of atmospheric air from pollution by emissions of organic fine particulate matter generated in confectionery enterprises. (Master's thesis). Research Institute "Ukrainian Research Institute of Environmental Problems", Kharkiv (in Ukrainian).
8. Effects on health of suspended particles. (2013). Implications for policy development in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. *WHO Regional Office for Europe Newsletter*. Copenhagen. Retrieved from [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0007/189052/Health-effects-of-particulate-matter-final-Rus.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0007/189052/Health-effects-of-particulate-matter-final-Rus.pdf?ua=1) (in Russian).
9. Nevmerzhtsky, N. V. (2016). Methodology for assessing and predicting extreme air pollution on highways with fine particulate matter PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>. (Master's thesis). St. Petersburg. Retrieved from <https://www.dissercat.com/content/metodika-otsenki-i-prognozirovaniya-ekstremalnogo-zagryazneniya-vozdukh-na-avtomagistralyakh> (in Russian).
10. Strelyaeva, A. B., Lavrentieva, L. M., Lupinogin, V. V. & Gvozdokov, I. A. (2017). Investigations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particles level in a residential area located near industrial enterprises. *Engineering Journal of Don*, (2), 8. Retrieved from <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4238> (in Russian).
11. Air Pollution: website. Retrieved from <https://www.air-pollution.ml> (in Russian).
12. Nekos, A., Medvedeva, Y. & Cherkashyna, N. (2019). Assessment of environmental risks from atmospheric air pollution in industrially developed regions of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(3), 511–518. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/111947>
13. Beketov, V., Yevtukhova, G. & Lomakina, O. (2016) Analysis and assessment of the air pollution level of Kharkiv. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, 26(3-4), 97–103. <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/7759> (in Ukrainian).
14. Kulyk, M. I. & Ivah, U. A. (2019). Assessment of the atmospheric air quality within the main bus stations Kharkiv. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, 31, 117–129. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2019-31-11> (in Ukrainian).
15. Lydina, V. I., Maksymenko, N. V. & Cherkashyna, N. I. (2019) Spatial distribution of air dust pollution in Kharkiv city. *Environmental protection: Collection of scientific articles of the XV All-Ukrainian Taliiyiv scientific readings*. Kharkiv, 2019, 124–125.
16. Directive 2008/50 / EC of the European Parliament and of Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=en>
17. WHO Air Quality Guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. (2005). Global update 2005. Summary of risk assessment. Geneva: WHO. Retrieved from [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_eng.pdf;jsessionid=464F804B47551ECF18AC385034A07DB3?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf;jsessionid=464F804B47551ECF18AC385034A07DB3?sequence=1)
18. European Air Quality Index. GIS Map Application. *European Environment Agency: website*. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index>
19. Weather archive in Kharkiv (airport). *Weather Schedule rp5.ua: website*. Retrieved from <https://rp5.ua/> (in Ukrainian).
20. Climate of Kharkiv. *Kharkiv Regional Center for Hydrometeorology: official information server*. Retrieved from : <http://kharkiv.meteo.gov.ua/klimat-kharkova/> (in Ukrainian).

Надійшла до редколегії 13.04.2020

Прийнята 22.05.2020