



Copyright (c) 2025 Svitlana Boychenko, Olena Kozak, Yulia Andrishko, Valentyn Yarynka

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Світлана Бойченко, Олена Козак, Юлія Андрішко, Валентин Яринка

**ОСОБЛИВОСТІ АЕРОЗОЛЬНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ
ЧАСТИНКАМИ $PM_{2.5}$ І PM_{10} ТА СТАН ЗЕЛЕНИХ НАСАДЖЕНЬ
В М.КИЄВІ В 2024 РОЦІ**

Svitlana Boychenko, Olena Kozak, Yulia Andrishko, Valentyn Yarynka

**FEATURES OF AEROSOL POLLUTION OF ATMOSPHERE
BY $PM_{2.5}$ AND PM_{10} PARTICLES AND THE STATE
OF GREEN SPACES IN KYIV IN 2024****АНОТАЦІЯ**

Мета роботи. Метою даного дослідження є комплексний аналіз динаміки аерозольного забруднення повітря в умовах мегаполіса з урахуванням просторового розподілу концентрацій $PM_{2.5}$ і PM_{10} , їх взаємозв'язків із погодними умовами та впливу на стан міських зелених насаджень.

Методологія. Методологія поєднує польові, лабораторні, статистичні й геоінформаційні підходи. Джерела даних: SaveEcoBot (сім автоматичних станцій), супутникові знімки Sentinel-2, векторні шари QGIS, оперативна інформація про ракетні обстріли, пилові бурі, пожежі, а також зразки листя дерев *Acer platanoides*, *Acer negundo*, *Tilia cordata*, *Populus nigra* та *Robinia pseudoacacia*, відібраних у зонах спостереження.

Наукова новизна. Дослідження є комплексним аналізом динаміки та просторового розподілу концентрацій $PM_{2.5}$ і PM_{10} у Києві в умовах 2024 року з урахуванням факторів воєнного впливу, пилових бур і пожеж. Уперше поєднано дані автоматизованого моніторингу, супутникових спостережень, геоінформаційного аналізу. Отримано нові емпіричні дані щодо рівня пошкодження зелених насаджень в умовах аерозольного навантаження.

Висновки. Рівень аерозольного забруднення повітря в Києві у 2024 році демонстрував численні короткотривалі перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК), зумовлені військовими обстрілами, пиловими бурями та пожежами. Спостереження за станом зелених насаджень в локаціях моніторингових станцій показали ознаки стресу деревних видів, що проявлялося у вигляді хлорозів, некрозів, та пошкодження патогенами листків дерев. Виявлено залежність між рівнем забруднення та морфо-фізіологічним станом дерев. Результати підкреслюють необхідність активного моніторингу якості повітря, адаптивного озеленення міста та врахування впливу війни в екологічній політиці. Застосований підхід є дієвим інструментом для діагностики урбоєкосистем в умовах багатфакторного стресу.

Ключові слова: аерозольні частинки $PM_{2.5}$ та PM_{10} , пилові бурі, пожежі, війна, зелені насадження

ABSTRACT

Purpose of the work. The purpose of this study is a comprehensive analysis of the dynamics of aerosol air pollution in a metropolis, taking into account the spatial characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations, relationships with weather conditions, and the impact on the condition of urban green spaces.

Methodology. The methodology combined field, laboratory, statistical and geoinformation approaches. Data sources included SaveEcoBot (seven automatic stations), Sentinel-2 satellite imagery, QGIS vector layers, real-time information on missile strikes, dust storms and fires, as well leaf samples from *Acer platanoides*, *Acer negundo*, *Tilia cordata*, *Populus nigra* and *Robinia pseudoacacia* trees collected at the observation sites.

Scientific novelty. The study is a comprehensive analysis of the dynamics and spatial distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in Kyiv in 2024, taking into account factors of military influence, dust storms and fires. For the first time, data from automated monitoring, satellite observations, and geoinformation analysis were combined. New empirical data were obtained on the level of damage of leaves under aerosol loading conditions.

Conclusions. The level of aerosol air pollution in Kyiv in 2024 demonstrated numerous short-term exceedances of the maximum permissible concentrations (MPC), caused by military shelling, dust storms and fires. Observations of urban plantations at the monitoring station sites revealed signs of stress in tree species, including chlorosis, necrosis, and pathogen-induced leaf damage. A relationship was found between the level of pollution and the morpho-physiological

state of trees. The results emphasize the need for active monitoring of air quality, adaptive greening of the city and taking into account the impact of war in environmental policy. The applied approach is an effective tool for diagnosing urban ecosystems under conditions of multifactorial stress.

Key words: PM_{2.5} and PM₁₀ aerosol particles, dust storms, fires, war, green spaces

Вступ

Забруднення атмосферного повітря в міських агломераціях є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності, що суттєво впливає на стан здоров'я населення, якість життя та стійкість міських екосистем (Renard et al., 2023; Tomson et al., 2023). Основними чинниками, які визначають погіршення якості повітря, є аерозольні частинки – тверді або рідкі мікрочастинки, зважені у повітрі. За класифікацією ВООЗ, найбільшу небезпеку для здоров'я людини становлять частинки PM_{2.5} і PM₁₀, що здатні проникати у нижні відділи дихальної системи та системний кровообіг, спричиняючи широкий спектр хронічних захворювань (WHO, 2010). Українські нормативи, з огляду на євроінтеграційний курс, певною мірою гармонізовані з європейськими директивами (Europe's air quality status, 2022). Зокрема, Директива 2008/50/ЄС «Про якість атмосферного повітря для Європи» встановлює граничне середньорічне значення концентрації для часток PM_{2.5} – 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, а для PM₁₀ – 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, тоді як граничне середньодобове значення концентрації для PM₁₀ – 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, а для часток PM_{2.5} граничного середньодобового значення не встановлено (Exceedance of air quality standards in Europe, 2024).

Міські території характеризуються високою щільністю населення, інтенсивним транспортним рухом, високою концентрацією промислових джерел викидів та значною площею штучних поверхонь, що формують додаткові джерела аерозольного навантаження. Київ як мегаполіс та столиця України є показовим прикладом великого міста з комплексною екологічною ситуацією, що поєднує вплив факторів антропогенного походження (транспорт, промисловість, зменшення площі зелених зон, «міський тепловий острів») із додатковими викликами, пов'язаними з наслідками воєнних дій (обстріли, вибухи, пожежі) (Boychenko et al., 2025; Karamushka et al., 2025). Під впливом цих чинників суттєво змінюється якість атмосферного повітря, а також умови існування міських екосистем.

Особливо важливою складовою міського середовища є зелені насадження, які відіграють роль природних фільтрів, стабілізують мікроклімат, поглинають пил та шум, підвищують стійкість міських територій до змін клімату. Водночас рослини чутливо реагують на підвищення рівня забруднення повітря, що проявляється як на клітинному рівні, так і у вигляді видимих морфологічних змін.

Метою дослідження є аналіз особливостей просторово-часового розподілу аерозольного забруднення атмосферного повітря частинками PM_{2.5} та PM₁₀ у м. Києві у 2024 році на основі даних семи наземних моніторингових станцій, а також оцінка стану міських зелених насаджень за результатами натурних обстежень.

Матеріали та методи дослідження

Методологія дослідження базувалася на інтеграції кількох джерел даних та методів – польових, лабораторних, статистичних і геоінформаційних, що забезпечило комплексний підхід до аналізу аерозольного забруднення повітря в умовах великого міста та стану зелених насаджень.

Основою аналізу концентрацій частинок PM_{2.5} і PM₁₀, стали відкриті дані платформи SaveEcoBot (ресурс: <https://www.saveecobot.com/maps>), яка агрегує інформацію з мережі громадських моніторингових станцій по всій Україні. Для м. Києва було відібрано сім найбільш стабільних та достовірних локацій (див. табл. 1). Період спостережень охоплює 01.01.2024-31.12.2024 і включає погодинні значення, які були усереднені до добових значень.

Польові дослідження проводилися в липні 2024 року у різних локаціях Києва, які включали райони з високим транспортним навантаженням та зелені зони (Kozak et al., 2025). На моніторингових ділянках досліджували листя найпоширеніших деревних порід, зокрема наступні: *Acer platanoides* (клен гостролистий), *Acer negundo* (клен ясенелистий), *Robinia pseudoacacia* (робінія звичайна), *Populus nigra* (тополя чорна) та *Tilia cordata* (липа серцелиста).

З кожного дерева для дослідження було відібрано по 10 листків. Для кожного зразка фіксували GPS-координати, дату відбору, проводили візуальну оцінку пошкоджень листя (у %), зокрема такі як хлорози, некрози, пігментація, пошкодження фітофагами та патогенами. Польові роботи проводилися з дотриманням принципів екологічної етики, без ушкодження або порушення цілісності дерев.

Для просторового аналізу використувалася QGIS 3.28 із відкритими шарами OpenStreetMap, супутниковими даними Sentinel-2 (обробка через Google Earth Engine) (ресурс: <https://earthengine.google.com>). Було створено векторні шари меж мікрорайонів Києва, основних транспортних артерій, водних об'єктів і зелених зон. Геоприв'язка даних дозволила аналізувати щільність забруднення по районах міста та стан зелених насаджень в заданих локаціях.

На основі даних ЗМІ та метеопорталів було відновлено дати повторюваності пилкових бур, пожеж і ракетних обстрілів з метою

співставлення їх із періодами максимальних концентрацій частинок $PM_{2.5}$ і PM_{10} у 2024 році.

В роботі застосовано статистичний аналіз емпіричних даних, графічна візуалізація була виконана за допомогою MS Excel.

Результати дослідження та обговорення

Особливості просторово-часового розподілу концентрацій $PM_{2.5}$ і PM_{10} за даними 7-ми моніторингових станцій у м. Києві в 2024 році.

Особливості просторово-часового розподілу концентрацій $PM_{2.5}$ і PM_{10} для семи вибраних локацій у Києві протягом 2024 року аналізувалися на основі даних наземного моніторингу (ресурс: <https://www.saveecobot.com>). У 2024 році середньорічна концентрація аерозольних частинок у місті Києві становила:

для $PM_{2.5}$ – $14.64 \pm 9.05 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$,
для PM_{10} – $23.06 \pm 14.85 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ (див. табл. 1).

Таблиця 1

Характерні значення вмісту аерозольних частинок розмірами $PM_{2.5}$ і PM_{10} на станціях спостереження в м. Києві в 2024 році

№	Станція моніторингу	Концентрації PM_{10} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$			Концентрації $PM_{2.5}$, $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
		Середньорічний вміст	Максимальні значення	Мінімальні значення	Середньорічний вміст	Максимальні значення	Мінімальні значення
1	Вул. Турівська, 28	22.3±12.4	92.7	5.2	13.6±7.8	54.6	3.0
2	Вул. Китайська, 22	22.5±13.7	90.0	3.8	13.9±8.2	59.5	3.1
3	Вул. Вербицького, 26	25.9±16.7	110.6	2.5	18.1±11.1	74.4	2.8
4	Харківське шосе, 7/1	25.5±17.1	106.7	3.1	16.2±10.3	77.9	2.5
5	Пр.Європейського союзу, 64г	21.1±14.7	107.0	3.2	13.2±8.3	56.2	2.2
6	Вул. Щусєва, 21	22.6±14.9	112.3	3.9	13.4±7.9	61.6	3.1
7	Пр.Берестейський, 97	21.3±13.2	93.8	3.9	13.8±8.0	61.8	2.8

Добові значення, які були усереднені до середньомісячних концентрацій аерозольних частинок розміром $PM_{2.5}$ і PM_{10} в атмосфері, представлені на рис. 1 (а, б). Протягом року концентрації частинок $PM_{2.5}$ демонстрували два чітко виражених максимуми – у березні ($21.4 \pm 3.3 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$) та у вересні ($21.6 \pm 3.1 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$). У холодний період року (жовтень–лютий) середньомісячні кон-

центрації частинок становили близько $15.5 \pm 1.3 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$, з максимальними значеннями у січні ($18.4 \pm 2.0 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$). В теплий період року (квітень–серпень) концентрації частинок становили в середньому – $10.1 \pm 1.3 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Розподіл концентрацій частинок PM_{10} протягом року мав подібний характер, хоча з певними відмінностями: два пікові періоди – у березні ($30.0 \pm 3.3 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$) та вересні

($42.0 \pm 5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) – та два мінімуми – у червні ($15.9 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) та грудні ($15.9 \pm 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Упродовж холодного (жовтень–лютий) і теплого (квітень–серпень) періодів середні концентрації PM_{10} становили близько $21.5 \pm 2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Максимальні добові концентрації частинок PM_{10} зафіксовані 1–2 квітня – $83.5 \pm 3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ та 3–4 жовтня квітня – $101.9 \pm 9.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ з перевищенням ГДК вдвічі,

а частинок $\text{PM}_{2.5}$ зафіксовано 20 вересня – $63.7 \pm 9.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ та 04 січня і 01 квітня – $43.9 \pm 7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ з перевищенням ГДК в 2–3 рази.

Співставлення добових концентрацій аерозольних частинок розмірів $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} в атмосфері в 2024 році, представлено на рис. 2.

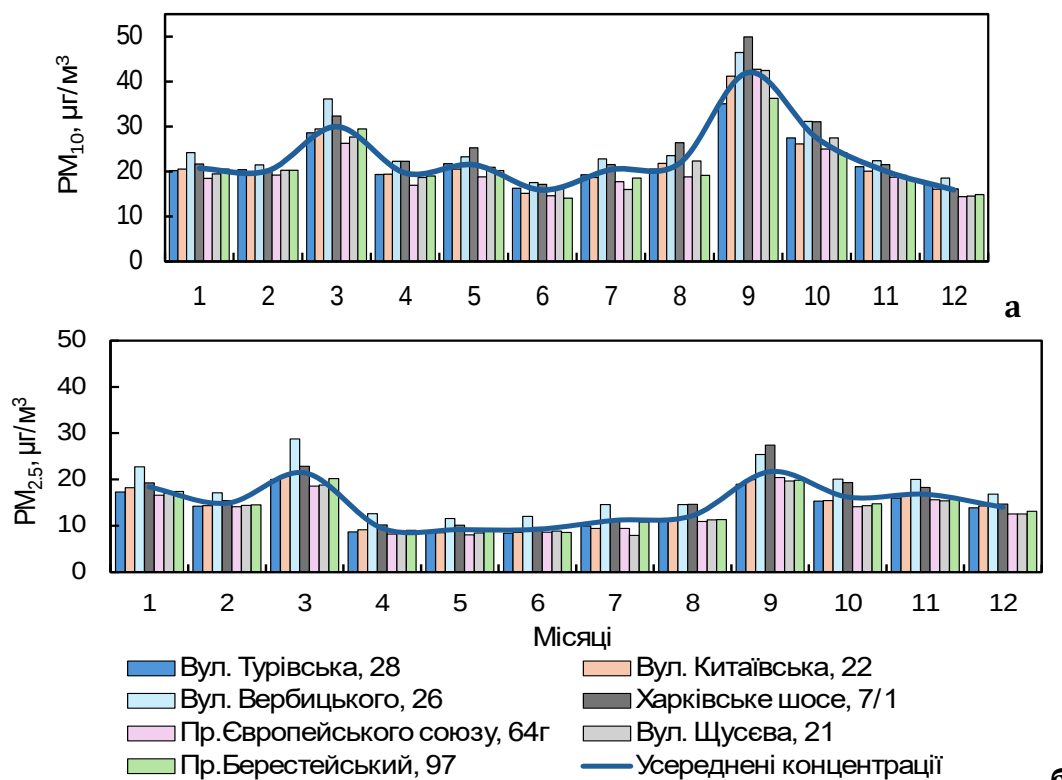


Рис. 1. Динаміка середньомісячних концентрацій в атмосфері аерозольних частинок розмірами PM_{10} (а) $\text{PM}_{2.5}$ (б) за даними 7-ми автоматизованих моніторингових станцій, розташованих в м.Києві в 2024 році

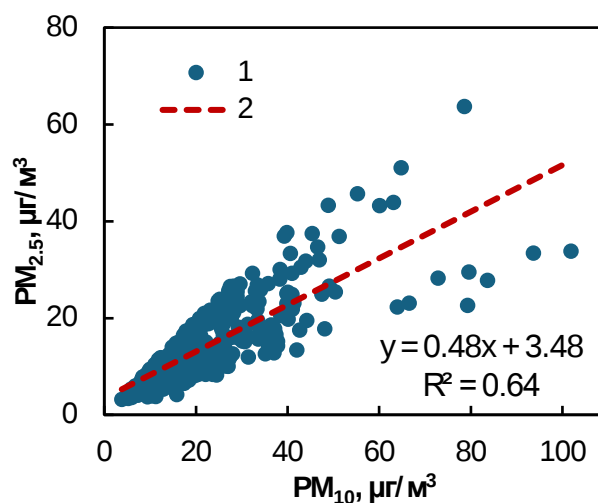
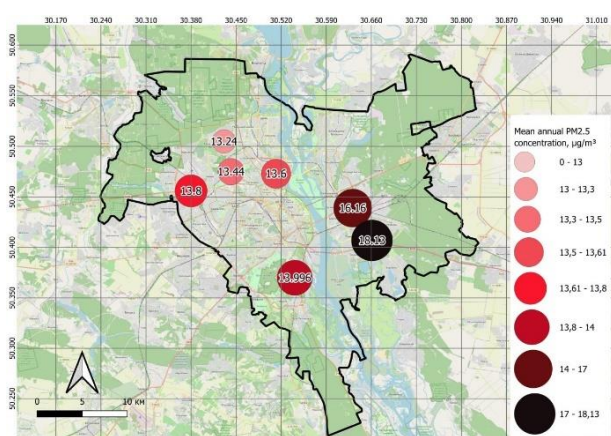


Рис. 2. Співставлення добових концентрацій аерозольних частинок розмірами $\text{PM}_{2.5}$ і PM_{10} в 2024 році в приземній атмосфері (1 – емпіричні дані, 2 – лінійна регресія)

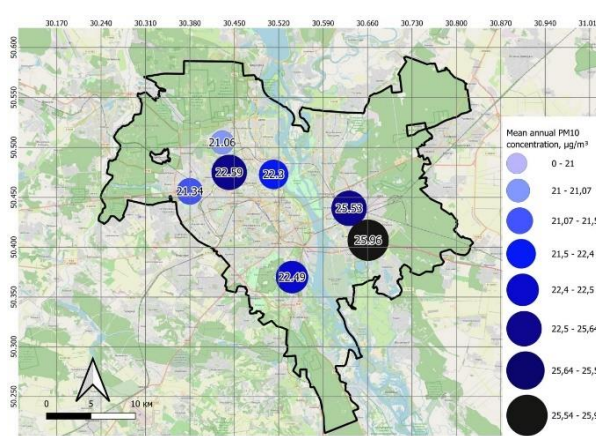
Коефіцієнт кореляції між цими величинами становить 0.80, що вказує на тісний позитивний зв'язок. Водночас відмінності у концентраціях можуть досягати до 20%, що може бути зумовлено різною природою та джерелами походження викидів.

Просторовий розподіл аерозольного забруднення частинками $PM_{2.5}$ і PM_{10} за даними 7-ми автоматизованих моніторингових станцій, представлено на рис. 3. Найвищі середньорічні концентрації обох фракцій зафіксовано на вул. Вербицького, 26: для $PM_{2.5}$ – $18.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, для PM_{10} – $25.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Високі показники також спостерігались на посту по Харківському шосе, 7/1: $16.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ для $PM_{2.5}$ та $25.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ для PM_{10} . Помірні значення концентрацій $PM_{2.5}$ зафіксовано на

станціях: вул. Китаївська, 22 ($13.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$); Берестейський проспект, 97 ($13.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$); вул. Турівська, 28 ($13.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$) та вул. Щусева, 21 ($13.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Для фракції PM_{10} помірні значення спостерігались на постах по вул. Щусева, 26 ($22.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$) та вул. Китаївській, 22 ($22.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Найнижча концентрація $PM_{2.5}$ відмічена на проспекті Європейського Союзу, 64 г – $13.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Для PM_{10} найнижчі значення зафіксовано на вул. Турівській, 28 ($22.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Берестейському проспекті, 97 ($21.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$) та проспекті Європейського Союзу, 67 г ($21.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Отже, на лівому березі Дніпра середні концентрації аерозольних частинок дещо вищі, ніж на правобережній частині міста.



А



Б

Рис. 3. Просторовий розподіл концентрацій $PM_{2.5}$ (а) та PM_{10} (б) у м.Києві за даними автоматизованих моніторингових станцій в 2024 році

Причини підвищеного аерозольного забруднення атмосфери в Києві у 2024 році. Підвищені концентрації аерозольних частинок у повітрі формуються як за рахунок фонових рівнів їх вмісту, так і під впливом місцевих чинників: інтенсивного автомобільного руху, промислових викидів, орографічних особливостей, погодних та мікрокліматичних умов. Додатковими джерелами є несприятливі природні явища – пилові бурі, суховії, пожежі в лісах та торф'яниках. Важливим чинником накопичення аерозольних частинок у приземному шарі повітря стали і наслідки війни – ракетні обстріли та атаки БпЛА.

Співставлення добових концентрацій аерозольних частинок PM_{10} та $PM_{2.5}$ у 2024 році з датами масштабних ракетних обстрілів, пожеж у лісах і торф'яниках, а

також пилових бур (на основі даних ЗМІ та метеопорталів) усереднені по 7-ми моніторинговим станціям, представлено на рис. 4. Основними подіями, що спричинили суттєве перевищення рівня аерозольного забруднення атмосфери в Києві у 2024 році, стали:

▪ **4 січня** – різке зростання концентрації частинок, зумовлене масованим обстрілом Києва БпЛА та ракетами типу «Кинджал», що спричинили численні пожежі;

▪ **кінець лютого-кінець березня** – тривале підвищення рівнів аерозольного забруднення через пожежі в екосистемах Київської області та самого Києва, зокрема внаслідок військових дій (атаки БпЛА, ракетні обстріли);

▪ **1 квітня** – різке зростання концентрацій твердих частинок, особливо фракції PM_{10} , через пилові бурі з регіону Сахари;

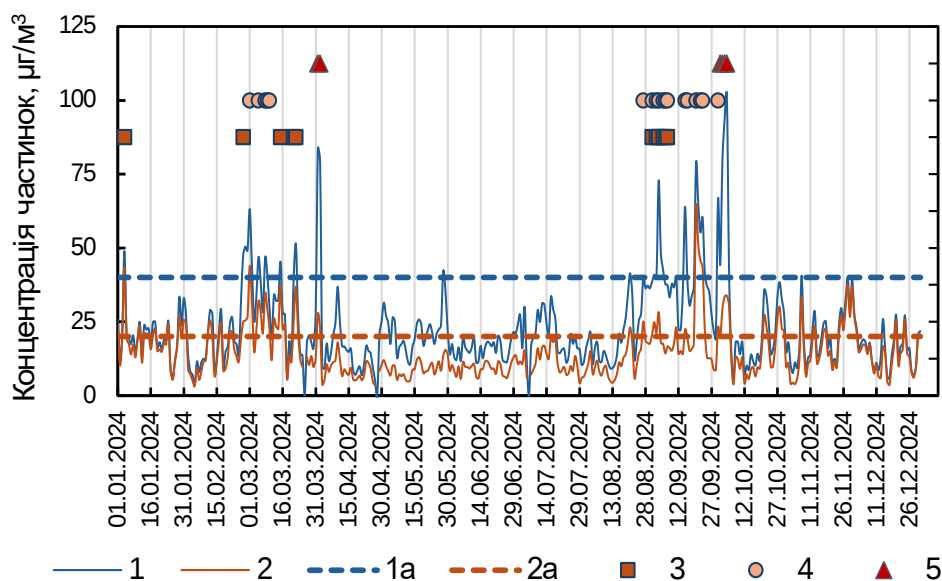


Рис. 4. Співставлення добової концентрації в атмосфері аерозольних частинок розмірами PM_{10} (1) та $PM_{2.5}$ (2) в м.Києві в 2024 році: 1а, 2а – ГДК (відповідно для частинок), 3 – атаки БПЛА та ракетні обстріли; 4 – пожежі в лісах та торф'яниках, 5 – пилові бурі, штормові вітри

▪27 серпня – 8 вересня – тривале перевищення концентрацій аерозольних частинок через масштабні лісові пожежі у Київській області, зокрема внаслідок падіння уламків БПЛА;

▪15 вересня – фіксовано підвищення концентрацій PM_{10} та $PM_{2.5}$ внаслідок пожеж у лісовій підстилці та на торфовищах у Київській області;

▪16 вересня – спостерігалась запилення через специфічні погодні умови, яке призвело до підвищеної запиленості в окремих районах області (горіння торфовищ, лісової підстилки районах Києва);

▪20 вересня – 4 жовтня – суттєве підвищення рівнів аерозольного забруднення внаслідок тривалих пожеж у Київській, сухої трави), а також супутніх атак БПЛА на Київ;

▪1–4 жовтня – фіксовано запилення, зумовлене перенесенням пилових частинок із Каспійської низовини, де у цей період спостерігалась інтенсивна пилова буря.

Оцінка стану зелених насаджень на 7-ми моніторингових ділянках в м. Києві на основі польових досліджень в липні 2024 року

Аерозольні частинки осаджуються в атмосфері шляхом сухої седиментації (під впливом сили тяжіння) або вологого випа-

дання – внаслідок вимивання з атмосфери опадами чи під час утворення хмар, коли частинки виступають ядрами конденсації та кристалізації (Aerosols and Their Importance, 2025). На ефективність утримання аерозолів впливають ряд мікро- та макроморфологічних характеристик листя [Хуе, et al., 2025; Park, S., 2022], зокрема наступні:

▪розмір продихів: існують розбіжності в результатах різних досліджень, проте загалом менший діаметр продихів сприяє ефективнішому затриманню частинок на поверхні;

▪восковий шар: наявність воскового шару або ефективне виділення восків та олій окремими видами рослин покращує здатність до фіксації частинок;

▪трихоми (опушення): наявність волосків і мікроскопічних виступів підвищує шорсткість поверхні листя, сприяючи утриманню аерозолів;

▪форма та розмір листя: вузьколисті види (зокрема з листям у формі голок) краще утримують аерозольні частки завдяки меншій амплітуді коливань і зменшенню турбулентності повітряних потоків;

▪жорсткість листя: жорсткі листові пластинки менш схильні до коливань під дією вітру, що сприяє кращому утриманню пилу;

■**щільність крони і кут нахилу листя:** густі крони знижують швидкість вітру і, відповідно, сприяють акумуляції частинок, зокрема найбільш ефективний кут нахилу листя для утримання аерозолів – 60–90°, тоді як при 30–60° ефективність зменшується.

З віком дерева здатність до акумуляції частинок підвищується, що зумовлене збільшення розміру крони та відповідно більшою площею листової поверхні. Після осідання аерозольні частинки можуть проникати у внутрішні тканини рослин через кутикулярні тріщини та продихи – основний шлях проникнення. Дрібнодисперсні частинки здатні транспортуватися судинною системою (флоемою) до інших тканин (Zhang et al., 2025; Molina, & Segura, 2021).

Аерозольне забруднення має негативний вплив на рослину, а саме: *спричинює механічні ушкодження* – пилові частинки пошкоджують клітини епідермісу; *впливає на процеси фотосинтезу* – за рахунок екранування світла, блокування продихів, зниження транспірації, порушення газообміну; *викликає біохімічні зміни* – спричиняють оксидативний стрес, накопичення токсичних речовин (наприклад, важкі метали).

Візуально стрес проявляється у вигляді хлорозів, некрозів, пігментації, передчасного старіння та навіть загибелі рослин при значних концентраціях.

Оксидативний стрес і фотосинтетичні порушення – основні наслідки впливу аерозольного забруднення. Насамперед уражаються пігменти (хлорофіли, каротиноїди), що призводить до їх деградації. Виявлено як зниження, так і підвищення співвідношення хлорофілів *a/b* у різних дослідженнях залежно від виду рослин і складу забруднювачів (Abriha-Molnár, et al., 2024; Shabnam et al., 2021). Хлорофіл *a* є більш чутливим до деградації під впливом пилових часток. Зміни у пігментному складі безпосередньо впливають на інтенсивність транспортування електронів і фіксацію CO₂, що призводить до підвищеного утворення активних форм кисню та стресової відповіді.

Хоча інформації щодо впливу аерозольного забруднення на рослини роду *Acer* недостатньо, дослідження стану фотосинтетичного апарату *Acer platanoides* та *Acer tataricum* у межах санітарно-захисної зони РЛП ім. С. Ковальської в м. Києві засвідчило, що цементний пил призводить до зниження фотосинтетичної активності листя. При

цьому встановлено, що *Acer platanoides* має нижчу адаптивну здатність до пилового забруднення порівняно з *Acer tataricum* (Laryuga I., 2018). Щодо *Robinia pseudoacacia*, то дослідження на схилах вулкана Везувій виявило цікаві зміни: рослини з більшим осадженням пилу мали більшу площу листя, значне потовщення паренхіми та зменшення міжклітинного простору приблизно на 30 %. Щільність продихів та фотохімічна ефективність фотосистем залишались майже незмінними, проте спостерігався вищий вміст хлорофілів *a* та *b*, а також каротиноїдів (Li et al., 2020).

Вплив аерозольного забруднення на рід *Populus* вивчався з позицій змін у фотосинтетичній активності. Зі збільшенням концентрації аерозолів у повітрі підвищується швидкість фотосинтезу як у добре освітленого, так і у затіненого листя тополі. Це пояснюється підвищенням різниці тиску насиченої водяної пари в умовах високого пилового навантаження, що сприяє відкриттю продихів і зростанню поглинання CO₂. Разом з тим, охолоджувальні властивості аерозольних частинок мають неоднозначний вплив на фотосинтетичну активність, оскільки за різних температурних режимів і періодів доби цей ефект може як підвищувати, так і знижувати ефективність фотосинтезу (De Micco et al., 2023). Інше дослідження продемонструвало, що аерозольне забруднення призводить до зниження транспіраційної активності тополь упродовж усього дня і навіть вночі (Wang B. et al., 2022).

Дослідження з *Tilia cordata* показали, що під впливом міського і промислового пилового забруднення спостерігається пошкодження хлоропластів і деградація хлорофілів *a* і *b*, особливо поблизу зон інтенсивного автомобільного трафіку. При цьому вміст каротиноїдів змінюється незначно і без статистично значущих змін, оскільки ці пігменти зазвичай деградують повільніше за хлорофіли (Bierza & Bierza, 2024). Інше дослідження, присвячене впливу твердих частинок на кілька видів, включаючи *Tilia cordata*, виявило, що пилове забруднення спричиняє зниження фотосинтетичної активності через блокування пор і продихів листя, що обмежує газообмін. Крім того, у дерев спостерігалось подовження пагонів і підвищення активності формування воскового шару як захисної реакції на забруднення (Łukowski et al., 2020).

На основі відібраних зразків дерев досліджуваних видів на зазначених моніторингових ділянках визначали загальний відсоток пошкодження та відсоток хлорозів,

некрозів, пігментації, пошкодження фітофагами та патогенами (див. рис. 5) (Kozak et al., 2025).

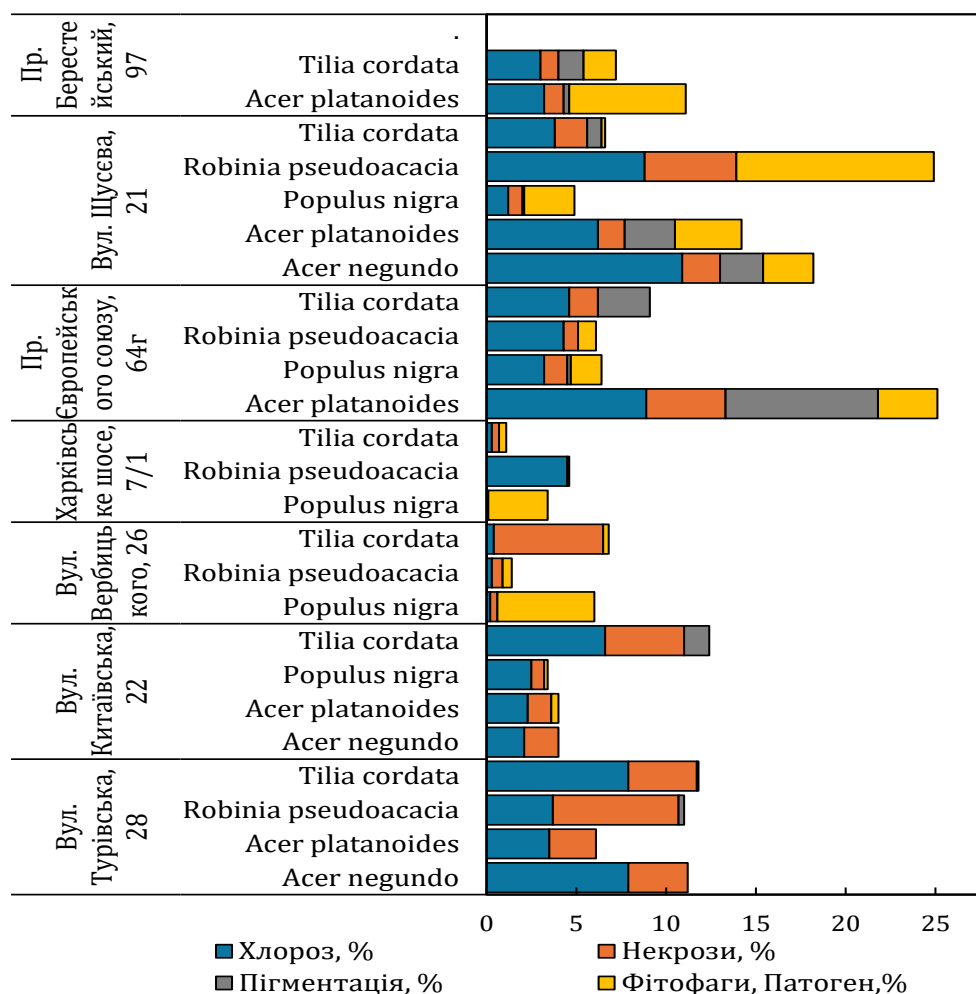


Рис. 5. Рівень пошкодження листя найпоширеніших видів дерев на семи досліджуваних ділянках у Києві зафіксовані в липні 2024 року

На ділянці біля Берестейського проспекту всі зразки листя досліджуваних видів мають усі типи пошкоджень. Найбільша частка пошкоджень у *Acer platanoides*, який на цій ділянці найбільше уражений фітофагами та патогенами, показник яких сягає близько 6.5 %, тоді як найменший відсоток пошкоджень припадає на пігментацію – приблизно 0.3 %. У *Tilia cordata* найбільше пошкоджень припадає на хлорози і становить близько 3 %, найменше – на некрози, приблизно 1 %.

На ділянці по вулиці Щусева найбільш пошкодженими виявилися листки у *Acer negundo* та *Robinia pseudoacacia*, тоді як найменш пошкодженими у *Populus nigra* та *Tilia cordata*. Для *Acer negundo* типовим є найвищий рівень хлорозів (~ 8.5 %) та

найнижчий – некрозів (~ 1.8 %). Для *Robinia pseudoacacia* найбільша частка пошкоджень спричинена фітофагами (~ 11 %). У *Populus nigra* основна частка пошкоджень припадає і на фітофагів (~ 2.8–2.9 %), а найменша – на пігментацію (~ 0.1 %). *Tilia cordata* мала найвищий рівень пошкоджень хлорозами (~ 3.8 %) та найнижчий – ураження фітофагами (~ 0.2%). На ділянці проспекту Європейського Союзу найбільше пошкоджень листків спостерігалось у *Acer platanoides*, тоді як найменше у *Robinia pseudoacacia* та *Populus nigra*. У *Robinia pseudoacacia* та *Populus nigra* домінують хлорози (~ 4.2 % та ~ 3.2 % відповідно). У *Acer platanoides* зафіксовано максимальні показники хлорозів (~ 8.9 %) і високий рівень пігментації

(~ 8.5 %), найменше ушкоджень спостерігається з боку фітофагів (~ 3.3 %).

Ділянка на Харківському шосе характеризується загалом низьким рівнем пошкоджень листя. У *Tilia cordata*, яка характеризується найменшим загальним відсотком пошкоджень, найбільше уражень припадають на фітофагів та некрози (~ 0.4 %). У дерев *Robinia pseudoacacia* домінують хлорози (~ 5.5 %). Для *Populus nigra* переважають ушкодження фітофагами (~ 3.3 %), некрози становлять ~ 0.1 %, інші форми ушкоджень не спостерігались.

На вулиці Вербицького найменш пошкодженими виявилися листки у *Robinia pseudoacacia*, найбільша частка пошкоджень у якої припадає на некрози (~ 0,6 %). У *Tilia cordata* найбільше пошкоджень було зумовлено некрозами (~ 6.1 %), а у *Populus nigra* фітофагами та патогенами.

На вулиці Китаївській найбільше пошкоджень листків спостерігалось у *Tilia cordata* з переважанням хлорозів (~ 6.6 %).

Для *Populus nigra* також переважають хлорози (~ 1.5 %), пігментація мінімальна (~ 0.05 %). У *Acer platanoides* та *Acer negundo* переважають хлорози та некрози (~ 1–2 %).

На вулиці Турівській найнижчий загальний відсоток пошкодження листків виявлений у *Acer platanoides*, з переважанням хлорозів та некрозів (~ по 3–4 %). Для *Tilia cordata* основна частка ушкоджень припадає на хлорози (~ 7.9 %). А листя *Robinia pseudoacacia* найбільше уражене некрозами (~ 7 %).

Найвищий рівень загального пошкодження листя спостерігається на ділянках вулиць Щусева та Європейського союзу, а найнижчий – на вулиці Вербицького та Харківському шосе, тоді як на трьох інших ділянках спостерігався середній відсоток пошкодження листків досліджуваних видів.

Просторовий розподіл загального відсотку пошкодження листя на досліджуваних ділянках представлений на рис. 6.

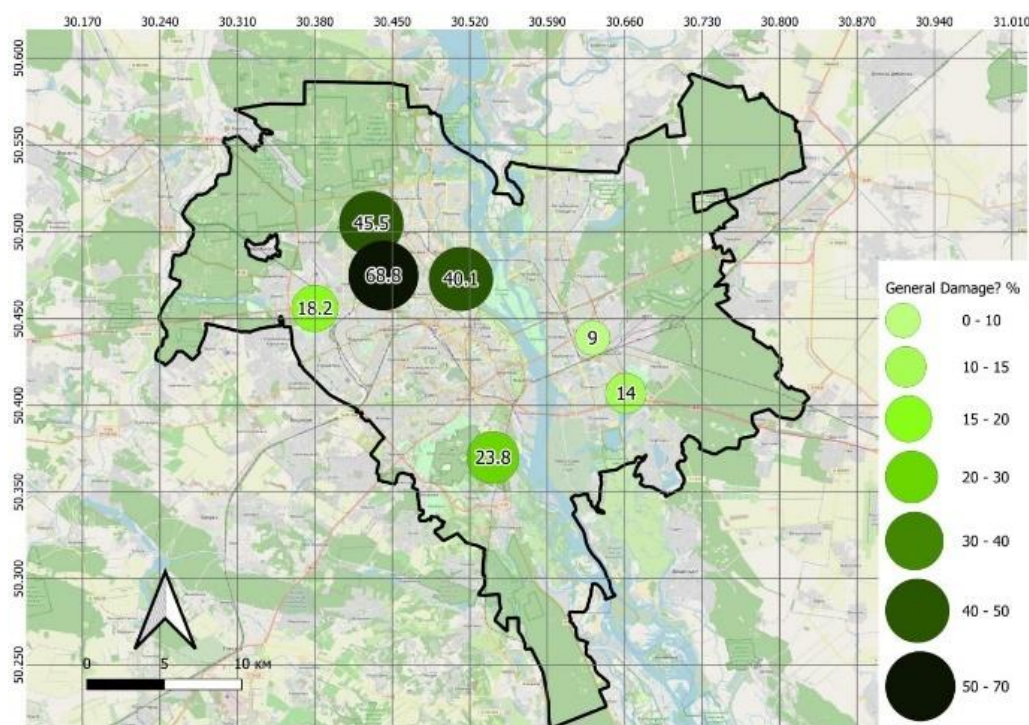


Рис. 6. Просторовий розподіл загального пошкодження листя дерев на 7 досліджуваних ділянках (1–7) у Києві в 2024 році

Варто відмітити, що ці показники не зовсім корелюють з даними по аерозольному забрудненню частинками PM_{10} та $PM_{2.5}$. Такі неоднозначні результати можуть бути спричинені цілим рядом факторів, зокрема напрямком вітру, наявністю будівель поруч,

затінненням, віком та здоров'ям окремих досліджуваних дерев тощо. Для детального вивчення впливу комплексу екологічних факторів на стан зелених насаджень варто проводити багаторічний моніторинг стану деревних видів.

Висновки

Проведене дослідження показало, що рівень аерозольного забруднення атмосферного повітря у Києві у 2024 році в середньорічному вимірі не перевищував гранично допустимих концентрацій (ГДК). Водночас були зафіксовані численні короткотривалі перевищення, зумовлені дією антропогенних та природних факторів, зокрема воєнними обстрілами, пиловими бурями та лісовими пожежами.

Дослідження базувалося на інтеграції кількох джерел даних та методів – польових, лабораторних, статистичних і геоінформаційних, що забезпечило комплексний підхід до аналізу аерозольного забруднення повітря у великому місті та його впливу на стан зелених насаджень.

У 2024 році середньорічні концентрації в приземному шарі атмосфери над Києвом не перевищували нормативів ЄС (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ для $\text{PM}_{2.5}$ та 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ для PM_{10}) і становили 14.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ для $\text{PM}_{2.5}$ та 23.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ для PM_{10} . Однак у певні періоди добові значення перевищували ГДК у 2–3 рази. Просторовий розподіл концентрацій вказує на підвищене

забруднення в районах з інтенсивним транспортним потоком і недостатньою кількістю зелених насаджень.

На досліджуваних ділянках найчастішими ушкодженнями листя виявилися хлорози, меншою мірою – ураження фітофагами та некрози. Найвищий рівень пошкодження листя зафіксовано на вулицях Щусева та Європейського Союзу, найнижчий – на вулиці Вербицького та Харківському шосе. На трьох інших ділянках спостерігався середній рівень пошкодження листків досліджуваних видів.

Водночас рівень пошкодження листя дерев не завжди корелює з показниками аерозольного забруднення, що може пояснюватися додатковими факторами: напрямком вітру, наявністю забудови, затіненням, віком та станом здоров'я окремих дерев тощо.

Отримані результати підтверджують необхідність розширення системи моніторингу, посилення озеленення міста видами, стійкими до забруднення, а також впровадження екологічної політики з урахуванням нових викликів.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів / The author declares no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

В цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

- Abriha-Molnár, V. É., Szabó, S., Magura, T., Tóthmérész, B., Abriha, D., Sipos, B., & Simon, E. (2024). Environmental impact assessment based on particulate matter, and chlorophyll content of urban trees. *Scientific Reports*, 14(1), 19911. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70664-4>
- Aerosols and Their Importance (2025). Earth. *Earth Science. Earth*. <https://earth.gsfc.nasa.gov/climate/data/deep-blue/aerosols> (accessed on 12 July 2025)
- Bierza, K., & Bierza, W. (2024). The effect of industrial and urban dust pollution on the ecophysiology and leaf element concentration of *Tilia cordata* Mill. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 58413–5842. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34999-9>
- Boychenko, S., Karamushka, V., Kuchma, T., & Nazarova, O. (2025). Military Actions and Climate Change as Drivers of Wildfires in Northern Regions of Ukraine in 2022-2023, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1474, 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1474/1/012002>
- Exceedance of air quality standards in Europe (2024). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/ims/exceedance-of-air-quality-standards> (accessed on 12 July 2025)
- Europe's air quality status (2022). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe2022/europes-air-quality-status-2022> (accessed on 12 July 2025)
- Karamushka, V., Boychenko, S., Khoriev, M.Yu., & Kozak, O.M. (2025). Destruction of the natural environment caused by the war in Ukraine: impact on land, water, and forest ecosystems. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1474, 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1474/1/012016>
- Kozak, O., Boychenko, S., Karamushka, V., Ievgen Khlobystov, Khoriev, M., Yarynka, V., Nazarova, O., Yevheniia Shemet, Yarovyi, A., Andrishko, J., Vorobiova, K., Shmatko, A., Sofiia Bochkor, Vladyslava Kudlai, Lysak, A., Lukina, Y., & Brodskyi, Ye. (2025). Assessment of the Health and Condition of Urban Trees as Part of Kyiv's Green Infrastructure: Findings from 2024 Field Research. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17863.20649>
- Lapyga, I. (2018). Condition Photosynthetic Apparatus of *Acer Platanoides* L. and *Acer Tataricum* L. on the Territory of Sanitary-Protective Zone "S. Kovalska RCS" in the City of Kyiv. *The International research and practical conference The Development of Nature Sciences: Problems and Solutions* : International conference paper, Brno, April 2018, 89–93. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5810720>
- Łukowski, A., Popek, R., & Karolewski, P. (2020). Particulate matter on foliage of *Betula pendula*, *Quercus robur*, and *Tilia cordata*: deposition and ecophysiology. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(10), 10296–10307. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07672-0>
- Molina, L., & Segura, A. (2021). Biochemical and Metabolic Plant Responses toward Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals Present in Atmospheric Pollution. *Plants*, 10(11), 2305. <https://doi.org/10.3390/plants10112305>
- Park, S., Lee, J. K., Kwak, M. J., Lim, Y. J., Kim, H., Jeong, S. G., Son, J., Oh, C.-Y., Je, S. M., Chang, H., Kim, K., & Woo, S. Y. (2022). Relationship between Leaf Traits and PM-Capturing Capacity of Major Urban-Greening Species. *Horticulturae*, 8(11), 1046. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111046>
- Renard, J.-B., Poincelet, E., Annesi-Maesano, I., & Surcin, J. (2023). Spatial Distribution of PM_{2.5} Mass and Number Concentrations in Paris (France) from the Pollutrack Network of Mobile Sensors during 2018–2022. *Sensors*, 23(20), 8560. <https://doi.org/10.3390/s23208560>

- Shabnam, N., Oh, J., Park, S., & Kim, H. (2021). Impact of particulate matter on primary leaves of *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111965. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111965>
- Tomson, M., Kumar, P., Kalaiarasan, G., Zavala-Reyes, J. C., Chiapasco, M., Sephton, M. A., Young, G., & Porter, A. E. (2023). Pollutant concentrations and exposure variability in four urban micro-environments of London. *Atmospheric Environment*, 298, 119624. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119624>
- WHO (2010). Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. World Health Organization. 498 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK138705/>, (accessed on 12 July 2025)
- Xue, W., Lin, Y., Sun, Z., Long, Y., Chen, D., & Yin, S. (2025). Effects of Leaf Trait Variability on PM Retention: A Systematic Review: *Atmosphere*, 16(2), 170. <https://doi.org/10.3390/atmos16020170>
- Zhang, K., Liang, Y., Ma, C., Guo, H., Liu, F., Gao, A., Liu, N., & Zhang, H. (2025). Stomata as the Main Pathway for the Penetration of Atmospheric Particulate Matter Pb into Wheat Leaves. *Toxics*, 13(3), 185. <https://doi.org/10.3390/toxics13030185>
- Li, J., Wang, X., Wang, Z.-H., Wang, B., Wang, C.-Z., Deng, M.-F., & Liu, L.-L. (2020). Effects of ozone and aerosol pollution on photosynthesis of poplar leaves. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44(8), 854–863. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2020.0022>
- De Micco, V., Amitrano, C., Balzano, A., Cirillo, C., Izzo, L. G., Vitale, E., & Arena, C. (2023). Anthropogenic Dusts Influence Leaf Anatomical and Eco-Physiological Traits of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) Growing on Vesuvius Volcano. *Forests*, 14(2), 212. <https://doi.org/10.3390/f14020212>
- Wang, B., Wang, C., Wang, Z., Wang, X., Jia, Z., & Liu, L. (2022). High aerosol loading decreases the transpiration of poplars both in the day- and night-time. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109225. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109225>

Received: 28.07.2025.**Accepted:** 02.10.2025**Published:** 16.12.2025**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Бойченко С., Козак О., Андрішко Ю., Яринка В. Особливості аерозольного забруднення атмосфери частинками PM_{2.5} і PM₁₀ та стан зелених насаджень в м. Києві в 2024 році. *Biota. Human. Technology*. 2025. № 3. С. 166–178. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.16>

Cite this article in APA style as:

Boychenko, S., Kozak, O., Andrishko, Y., & Yarynka, V. (2025). Osoblyvosti aerzolnoho zabrudnennia atmosfery chastynkamy PM_{2.5} i PM₁₀ ta stan zelenykh nasadzhzen v m. Kyievi v 2024 rotsi [Features of aerosol pollution of atmosphere by PM_{2.5} and PM₁₀ particles and the state of green spaces in Kyiv in 2024]. *Biota. Human. Technology*, (3), 166–178. <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.16> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Boychenko S. [in Ukrainian: Бойченко С.]¹, Dr.Sc. (Geography), Assoc. Prof., email: s.boychenko@ukma.edu.ua

ORCID: 0000-0003-3590-5988

Scopus Author ID: 7801624588

Department of Environmental Studies, National University of Kyiv-Mohyla Academy

2 Skovorody Street, Kyiv, 04655, Ukraine

Kozak O. [in Ukrainian: Козак О.]², PhD (Biology), PhD (Ecology), Assoc. Prof., email: o.kozak@ukma.edu.ua

ORCID: 0000-0002-0399-0631

Scopus Author ID: 56448527900

Department of Environmental Studies, National University of Kyiv-Mohyla Academy

2 Skovorody Street, Kyiv, 04655, Ukraine

Andrishko Y. [in Ukrainian: Андрішко Ю.]³, BSc in Ecology, e-mail: yuliia.andrishko@ukma.edu.ua

ORCID: 0009-0008-7665-2861

Department of Environmental Studies, National University of Kyiv-Mohyla Academy

2 Skovorody Street, Kyiv, 04655, Ukraine

Yarynka V. [in Ukrainian: Яринка В.]⁴, MSc in Molecular Physiology and Biophysics, e-mail: v.yarynka@ukma.edu.ua

ORCID: 0009-0009-4905-3043

Department of Environmental Studies, National University of Kyiv-Mohyla Academy

2 Skovorody Street, Kyiv, 04655, Ukraine

¹ Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

² Study design, data collection, manuscript preparation.

³ Data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

⁴ Data collection, statistical analysis.