

ЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОСИСТЕМ

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-01>

УДК(UDC): 504.3.054:349.6

О. О. ГОЛОЛОБОВА¹, канд. с.-г. наук, доц.,

доцент кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи

e-mail: elena.gololobova@karazin.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5558-2114>

Т. С. РЕЗНІК¹,

бакалавр

e-mail: rieznik2021.9512125@student.karazin.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-5154-3117>

В. О. ДАМБРАУСКАС¹,

бакалавр

e-mail: valentyna.dambrauskas@student.karazin.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0459-0268>

С. Р. КОМАР¹,

бакалавр

e-mail: sofiia.komar@student.karazin.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-9709-3034>

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ІНДИКАТИВНІ ВИМІРИ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ В МЕЖАХ ГАРМОНІЗАЦІЇ ЗАКОНОДАВСТВА З ЄВРОПЕЙСЬКИМИ СТАНДАРТАМИ (НА ПРИКЛАДІ МІСТ ХАРКІВ ТА КРОПИВНИЦЬКИЙ)

Мета. Аналіз правових засад індикативних вимірювань якості атмосферного повітря в Україні та оцінка їх ефективності на прикладі міст Харкова і Кропивницького у 2024–2025 роках з урахуванням впливу воєнних умов.

Методи. Системний аналіз, статистичні.

Результати. Встановлено відповідність національного законодавства вимогам Директиви 2008/50/ЄС щодо індикативних вимірювань якості атмосферного повітря. Громадська мережа EcoCity стала дієвим інструментом збору даних про якість атмосферного повітря в умовах війни. Дослідження виявило значні відмінності в якості повітря між Харковом і Кропивницьким через вплив бойових дій. У Харкові зафіксовано різкі піки концентрацій $PM_{2.5}$ та PM_{10} , тоді як у Кропивницькому переважають традиційні джерела забруднення, зокрема, транспорт, промисловість, з помірними показниками $PM_{2.5}$. Радіаційний фон в обох містах залишався стабільним і безпечним, не перевищуючи природний фон. У Кропивницькому середній радіаційний фон вищий, ніж у Харкові, що зумовлено геологічними особливостями території. У Харкові зафіксовано короточасні підвищення концентрації NO_2 тривалістю 2–5 діб, характерні для зон бойових дій. Мінливість концентрацій CO у Харкові пов'язана з сезонними факторами, метеорологічними умовами, інтенсивністю автотранспорту, промисловими викидами та впливом бойових дій.

Висновки. Правове забезпечення моніторингу якості атмосферного повітря в Україні за останні п'ять років значно вдосконалено відповідно до європейських стандартів. Воєнні дії спричинили новий тип забруднення повітря з короточасними, але інтенсивними викидами, особливо в прифронтових містах. Індикативні вимірювання, реалізовані через громадські мережі, зокрема EcoCity, виявилися ефективним інструментом для оперативного визначення показників якості повітря в умовах війни.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: моніторинг атмосферного повітря, екологічне законодавство, індикативне вимірювання, громадська мережа EcoCity

Як цитувати: Гололобова О. О., Резнік Т. С., Дамбраускас В. О., Комар С. Р. Індикативні виміри забруднення повітря в Україні в межах гармонізації законодавства з європейськими стандартами (на прикладі міст Харків та Кропивницький). *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2025. Вип. 33. С. 8–20. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-01>

In cites: Gololobova, O. O., Rieznik, T. S., Dambrauskas, V. O., & Komar, S. R. (2025). Indicative measurements of air pollution in Ukraine within the limits of legal harmonization with european standards (using the example of Kharkiv and Kropyvnytsky cities). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (33), 8–20. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-01> (in Ukrainian)

Вступ

Моніторинг стану атмосферного повітря є невід'ємним інструментом екологічної політики України, що сприяє сталому розвитку та захисту довкілля. Забруднення повітря створює серйозні ризики для здоров'я населення, екосистем, що вимагає вдосконалення законодавчої бази та організаційних механізмів у цій галузі. Останніми роками Україна активно працює над оновленням своєї законодавчої та організаційної системи моніторингу довкілля, впроваджуючи сучасні технології та адаптуючись до європейських екологічних норм. Ці заходи відповідають зобов'язанням, визначеним Угодою про асоціацію з ЄС, яка вимагає узгодження українського законодавства з європейськими екологічними стандартами, зокрема з Директивою 2008/50/ЄС щодо якості повітря в атмосфері [1].

Директива 2008/50/ЄС, прийнята Європейським Парламентом і Радою, є ключовим документом, що регулює якість атмосферного повітря в країнах ЄС. Вона спрямована на забезпечення чистого повітря шляхом встановлення стандартів і заходів для контролю забруднення. Нормативний акт визначає гранично допустимі рівні концентрації забруднюючих речовин, зокрема, твердих часток (PM_{10} та $PM_{2.5}$), озону (O_3), діоксиду азоту (NO_2), діоксиду сірки (SO_2) тощо. Ці норми спрямовані на захист здоров'я людей і довкілля, слугуючи орієнтиром для країн, що прагнуть відповідності європейським стандартам. Директива 2008/50/ЄС встановлює чіткі стандарти для моніторингу якості атмосферного повітря, визначаючи параметри, періодичність вимірювань і методи аналізу. Це сприяє отриманню точних і достовірних даних про стан атмосфери. Нормативи директиви слугують основою для розробки національних законодавчих актів у країнах ЄС, визначаючи базові вимоги до якості атмосферного повітря. Ця Директива створює структуровану систему для контролю та оцінки стану атмосферного повітря, забезпечуючи єдиний підхід у країнах-членах ЄС [2].

Актуальність проблеми забруднення атмосферного повітря в Україні посилюється воєнними діями, які призводять до різних змін у якості повітря через бомбардування, пожежі та промислові аварії.

Численні дослідження підтверджують значний вплив війни на якість повітря та необхідність удосконалення моніторингових систем. Дослідження Zalakeviciute et al. [3] аналізує вплив російсько-української війни на концентрації забруднюючих речовин (NO_2 , CO , O_3 , SO_2 , $PM_{2.5}$) за допомогою супутникових даних і наземного моніторингу в Києві, показуючи різке зростання $PM_{2.5}$ через вибухи та пожежі, що загрожує здоров'ю населення. Hryhorczuk et al. [4] підкреслюють екологічні наслідки війни, включаючи забруднення повітря токсичними речовинами від руйнування інфраструктури та пожеж, з акцентом на довгострокові ризики для здоров'я, такі як респіраторні захворювання. Leal Filho et al. [5] надають огляд загальних екологічних впливів, зазначаючи зростання викидів забруднювачів (наприклад, $PM_{2.5}$ до $24.2 \mu g/m^3$ та NO_2 до $139.7 \mu mol/m^2$) через військову діяльність, що вимагає екологічно орієнтованої відбудови. Hanoshenko et al. [6] акцентують на проблемі забруднення повітря відходами війни, зокрема через горіння матеріалів і руйнування інфраструктури, що спричиняє локальні піки $PM_{2.5}$ та інших токсичних речовин. Ці дослідження підкреслюють необхідність посиленого моніторингу в умовах війни для оперативного реагування на забруднення.

Україна активно імплементує принципи які зазначено у Директиві 2008/50/ЄС до системи державного моніторингу якості атмосферного повітря. Згідно з Постановою КМУ № 827 від 14.08.2019 «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» в Україні оновлено механізми державного контролю якості атмосферного повітря. Цією Постановою затверджений Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря, який передбачає систематичні спостереження за показниками атмосферного повітря з використанням стандартизованих методів вимірювань. Збір даних здійснюється через мережу стаціонарних та мобільних станцій моніторингу, розташованих у визначених зонах та агломераціях. Відбір проб проводиться з урахуванням вимог до частоти контролю, що залежить від категорії досліджуваної території. Аналітична

обробка отриманих результатів включає визначення концентрацій нормованих забруднюючих речовин, розрахунок середньодобових та середньорічних показників, порівняння з встановленими гранично допустимими концентраціями. Для стандартизації оцінки впроваджено індекс якості повітря в Україні – показник, що використовується в рамках проведення моніторингу атмосферного повітря для відображення інформації про комплексний вплив рівнів основних забруднюючих речовин на здоров'я населення в адаптованому для користувача форматі. Інформаційно-аналітичні системи забезпечують зберігання, систематизацію та візуалізацію даних моніторингу. Вони дозволяють проводити трендовий аналіз та моделювання розподілу забруднюючих речовин в атмосфері [7].

Директива 2008/50/ЄС також визначає мінімальну кількість пунктів моніторингу в залежності від типу зони (міські, промислові, сільські) та рівня забруднення. Для кожного нормованого забруднювача (SO_2 , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, свинець, бензол тощо) встановлено окремі вимоги до частоти відбору проб, тривалості вимірювань та методам аналізу, що мають відповідати стандартам Європейського комітету з стандартизації (CEN). Зокрема, для твердих частинок (PM_{10} та $\text{PM}_{2.5}$) передбачено щоденний відбір проб у міських агломераціях, застосування автоматичних методів вимірювання з неперервною реєстрацією даних, перевірку результатів за допомогою еталонних методів вагового аналізу. Для газоподібних забруднювачів (SO_2 , NO_2 , озон) директива вимагає використання автоматизованих аналітичних систем із високою роздільною здатністю, калібрування обладнання згідно з європейськими протоколами, забезпечення безперервного моніторингу у зонах із підвищеним ризиком. Результати моніторингу обов'язково публікуються у відкритих звітах з детальним аналізом просторово-часової динаміки забруднення та оцінкою впливу на здоров'я населення.

Важливим нормативним документом, який встановлює правові засади організації та функціонування системи моніторингу якості атмосферного повітря в Україні став Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 21 квітня 2021 року № 300 «Про затвердження Порядку розміщення пунктів

спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях» [8]. Цей документ є частиною реалізації стратегії оновлення функціонування системи екологічного моніторингу атмосферного повітря в Україні, доповнюючи Закон України «Про охорону атмосферного повітря» та постанови Кабінету Міністрів. Наказ сприяє створенню комплексної системи спостереження за якістю повітря, яка відповідає європейським стандартам.

Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 2021 року № 147 «Про затвердження форми Програми державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» [9] є наступним важливим етапом у вдосконаленні нормативної бази для контролю якості повітря в Україні. Цей документ встановлює уніфіковану форму Програми державного моніторингу, створюючи підґрунтя для системного підходу до управління станом атмосферного повітря. Запровадження єдиних стандартів збору даних сприяє підвищенню їхньої точності та надійності. Такий підхід забезпечує ефективний обмін екологічною інформацією між державними органами, науковими організаціями та громадськістю, відповідаючи принципам відкритості екологічних даних, визначеним у Директиві 2003/4/ЄС та формую правову основу для активної участі зацікавленої громадськості у здійсненні контролю за станом атмосферного повітря.

Індикативні вимірювання, передбачені Директивою 2008/50/ЄС, відіграють ключову роль у розширенні моніторингу якості повітря, особливо в умовах обмежених ресурсів. Дослідники Kuula et al. [10] пропонують інтеграцію низьковартісних сенсорів для індикативних вимірювань $\text{PM}_{2.5}$ та NO_2 , що відповідають менш суворим вимогам якості даних, але забезпечують реальний час моніторингу в урбанізованих зонах, що є актуальним для України в умовах війни. Дослідження демонструють ефективність сенсорних мереж (наприклад, Kunak, Airly) для індикативних вимірювань, які дозволяють зменшити кількість фіксованих станцій і виявити локальні тренди забруднення NO_2 до 89% [11].

Директива 2008/50/ЄС має значний вплив на впровадження заходів, спрямованих на забезпечення доступу громадськості

до екологічної інформації, що відповідає європейським стандартам. Кейсом слугує створення в Україні автоматизованої системи «ЕкоСистема», яка сприяє публічному доступу до даних про стан атмосферного повітря в режимі реального часу. Проект співпрацює з Міністерством екології та природних ресурсів України та громадськими платформами, що зацікавлені в републікації екологічних даних, що дозволяє реалізувати ідею активної взаємодії громадянського суспільства і Уряду у сфері екологічної політики та захисту навколишнього природного середовища. Єдина екологічна платформа «ЕкоСистема» – це загальнодержавна автоматизована інформаційно-аналітична платформа, призначена для забезпечення доступу до екологічної інформації. Вона підтримує процеси створення, збору, отримання, зберігання, використання, поширення, захисту та охорони даних, а також забезпечує електронну взаємодію між фізичними особами, юридичними особами, підприємцями, надавачами адміністративних і публічних (електронних) послуг, а також центрами надання адміністративних послуг у сфері охорони довкілля [12].

Завдання ЕкоСистеми, зокрема, полягає у забезпеченні громадянам права на вільний доступ до даних про стан довкілля, підвищенні відкритості рішень, які приймають органи державної влади та місцевого самоврядування, а також у створенні дієвого механізму запобігання корупції та зміцненні громадського нагляду за використанням природних ресурсів. Ці завдання є ключовими для виконання Україною зобов'язань за Орхуською конвенцією. Ця конвенція, офіційно відома як Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі

прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля, ратифікована Україною в 1999 році, забезпечує правову основу для реалізації права громадян на доступ до екологічної інформації, участь у прийнятті екологічних рішень і захист своїх екологічних прав, сприяючи прозорості, запобіганню корупції та посиленню громадського контролю за управлінням природними ресурсами [13].

Імплементація принципів Директиви 2008/50/ЄС в Україні сприяла законодавчій підтримці громадського моніторингу якості повітря, що разом із положеннями Орхуської конвенції, яка гарантує доступ до екологічної інформації та участь громадськості в прийнятті рішень, стимулювала розвиток громадських моніторингових систем, таких як EcoCity [14], SaveDnipro [15], коаліція організацій, що займаються моніторингом та лобіюванням екополітики «Чисте повітря для України» [16].

Директива 2008/50/ЄС та Орхуська конвенція перетворюють громадян на активних учасників, надаючи громадським організаціям можливість здійснювати власні вимірювання за умови застосування сертифікованого обладнання.

Наступним важливим кроком у екологічну інтеграцію України з ЄС стало прийняття Наказу Міністерством охорони здоров'я України «Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць» від 10.05.2024 № 813. Він впроваджує європейські стандарти якості повітря, забезпечує механізми моніторингу відповідно до вимог ЄС, сприяє захисту здоров'я громадян на основі європейських підходів [17].

Методи дослідження

Індикативні вимірювання – це вимірювання, які відповідають вимогам щодо якості даних, які є менш суворими, ніж вимоги до фіксованих вимірювань [1, 2]. Згідно з Директивою 2008/50/ЄС про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи використання додаткових методів оцінки створює можливість зменшити необхідну мінімальну кількість фіксованих пунктів відбору проб. Індикативні вимірювання ґрунтуються на використанні портативних і доступних за вартістю пристроїв, таких як станція EcoCity, для

отримання даних у режимі реального часу. Відносно бюджетна ціна станцій дозволяє їх застосовувати у значно більшій кількості, ніж стаціонарні пости спостереження і, таким чином, отримати додаткове джерело інформації з великим покриттям. Водночас метод індикативних вимірювань є більш достовірним, ніж моделювання. Це зменшить фінансове та ресурсне навантаження на суб'єктів моніторингу – органів місцевого самоврядування [18].

Індикативні вимірювання показників якості атмосферного повітря проводились з

початку квітня 2024 року по третю декаду березня 2025 року в м. Харків та м. Кропивницький за допомогою громадської мережі моніторингу EcoCity. Дана система базується на автоматизованих станціях, які щохвилини фіксують показники забруднення та передають дані на сервер.

Станції EcoCity розроблені на платформі Arduino з використанням Ethernet для стабільного зв'язку. В якості сенсорів застосовувались такі пристрої:

- SDS011 – для вимірювання концентрації $PM_{2.5}$ та PM_{10} (похибка $\pm 10\%$);

- DHT22 – для визначення температури (точність $\pm 0,5^\circ C$) та відносної вологості (точність $\pm 5\%$);

- BMP180 – для фіксації атмосферного тиску (точність ± 1 hPa);

- Мікрофон з підсилювачем – для оцінки рівня вуличного шуму (перетворення аналогового сигналу в цифровий);

- Трубка Гейгера з UART-інтерфейсом – для вимірювання радіаційного фону. [14].

У м. Харків фіксувалися тверді частки ($PM_{2.5}$, PM_{10}), радіаційний фон, аміак (NH_3), діоксид азоту (NO_2), монооксид вуглецю (CO). У м. Кропивницький – $PM_{2.5}$, PM_{10} , радіаційний фон.

Результати дослідження та обговорення

Аналіз концентрацій дрібнодисперсних часток $PM_{2.5}$ у м. Харків за період з 09.04.2024 по 20.03.2025 показав значну мінливість забруднення повітря за цим показником (Рис. 1). Середньодобове значення концентрації склало $8,31$ $мкг/м^3$, що нижче за представлені у Глобальних рекомендаціях ВООЗ щодо якості повітря та впливу на здоров'я добову гранично допустиму норму (15 $мкг/м^3$), але значно перевищує річний рекомендований рівень (5 $мкг/м^3$). Медіана ($4,28$ $мкг/м^3$) свідчить про те, що в більшість досліджуваних днів рівень забруднення був відносно низьким, але періодично спостерігалися різкі піки (максимум $188,70$ $мкг/м^3$). Висока мінливість даних підтверджується коефіцієнтом варіації (241%), що вказує на сильну неоднорідність концентрацій $PM_{2.5}$ за часом. Це також підкреслюється значним стандартним відхиленням ($20,00$ $мкг/м^3$) та великою дисперсією ($345,80$), що свідчить про наявність днів з екстремально високим рівнем забруднення. Результати перевірки нормальності розподілу ($6,85$) свідчать про

Для аналізу показників використовували нормативи якості повітря, а саме, гранично допустимі концентрації (ГДК), затверджені Міністерством охорони здоров'я України [17] та глобальні рекомендації ВООЗ щодо порогових значень і граничних значень для основних забруднюючих речовин, що становлять ризик для здоров'я [19].

Для всіх показників виконано статистичне оброблення даних, яке включало розрахунок таких характеристик: середнє арифметичне, медіана, максимум, мінімум, коефіцієнт варіації та дисперсія. Додатково оцінювалася нормальність розподілу за допомогою функцій Microsoft Excel. SKEW: визначає коефіцієнт асиметрії, який характеризує відхилення розподілу від симетричного. KURT: обчислює коефіцієнт ексцесу, що відображає ступінь гостроти піку розподілу порівняно з нормальним.

Для виявлення аномалій використано метод міжквартильного розмаху (IQR), який дозволив ідентифікувати періоди з екстремальними значеннями показників [20].

Використовуючи Microsoft Excel, для кожного досліджуваного параметра створено лінійні графіки, які ілюструють динаміку їхніх змін упродовж періоду дослідження.

його відхилення від нормального, що характерно для даних із рідкісними, але дуже високими значеннями.

Вищезазначені статистичні показники, зокрема, коефіцієнт варіації (241%) і стандартне відхилення ($20,00$ $мкг/м^3$), підкреслюють відсутність стабільності – що є типовим для прифронтового міста. Асиметрія даних ($6,85 > 0$) вказує на численні екстремальні значення, що відповідають періодам інтенсивних обстрілів.

Кластери аномальних значень для $PM_{2.5}$ зафіксовані тричі: 11 квітня 2024 (71 $мкг/м^3$), з 4 по 8 червня 2024 року (від $52,3$ до $188,7$ $мкг/м^3$) та з 10 по 14 червня 2024 року (від $43,8$ до $165,2$ $мкг/м^3$).

Незначні перевищення вмісту $PM_{2.5}$ спостерігалися 19 вересня 2024 та 30 січня 2024 та склали відповідно $34,33$ та $36,1$ $мкг/м^3$.

Розподіл концентрацій PM_{10} за цей же період спостережень представлений на рис 2. Середньодобова концентрація ($14,16$ $мкг/м^3$), нижча за європейські ліміти (50

мкг/м³) та не перевищує річний рекомендований орієнтир ВООЗ (15 мкг/м³). Проте справжню загрозу відображають не середні цифри, а вражаючий розкид значень – від майже чистого повітря (1,20 мкг/м³) до надзвичайно високих піків (198,90 мкг/м³), що перевищують норму до 4 разів. Ключові

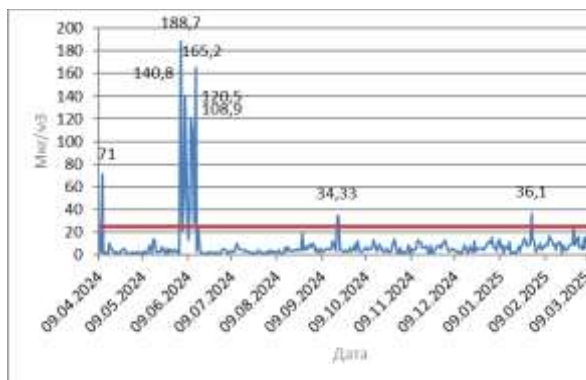


Рис. 1 – Розподіл концентрацій $PM_{2.5}$ у період з 09.04.2024 по 20.03.2025, мкг/м³, м. Харків

Fig. 1 – Distribution of $PM_{2.5}$ between April 9, 2024, and March 20, 2025, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Kharkiv

нюючих речовин, яка не перевищує гранично допустиму концентрацію (ГДК) у 50 мкг/м³.

Але систематичні екстремальні викиди (коефіцієнт варіації 155%) демонструють непридатний для мирного часу рівень концентрації PM_{10} . «Важкий хвіст» розподілу (асиметрія $5,72 > 0$) вказує на регулярні надзвичайні події – вибухи, пожежі, руйнування, а також вторинні ефекти забруднення атмосферного повітря: підвищений пил від руїн, роботи техніки, генераторів.

Кластери аномальних значень твердих часток PM_{10} припадають на квітень, червень 2024 року та січень 2025 року. 11 квітня 2024 року концентрація забруднюючих речовин склала 138,9 мкг/м³.

З 4 по 8 червня 2024 року показники коливалися в межах від 54,9 мкг/м³ до 198,9 мкг/м³. З 10 по 14 червня 2024 року значення варіювалися від 46 мкг/м³ до 172,7 мкг/м³. 30 січня 2025 року рівень забруднення досяг 81,8 мкг/м³.

Незначні перевищення зафіксовані 19.09.2024 – 50,82 мкг/м³

Аналіз результатів вказує на значну нерівномірність забруднення $PM_{2.5}$ та PM_{10}

особливості розподілу такі: медіана (9,30 мкг/м³) суттєво нижча за середнє, що свідчить про те, що в 50% днів рівень забруднення залишався відносно безпечним, із більшістю даних у межах від 1,2 до 20,5 мкг/м³. Понад половина вимірювань вказує на низьку або помірну концентрацію забруд-

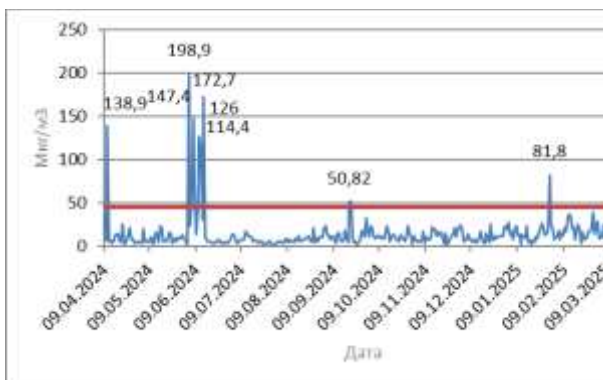


Рис. 2 – Розподіл концентрацій PM_{10} у період з 09.04.2024 по 20.03.2025, мкг/м³, м. Харків

Fig. 2 – Distribution of PM_{10} concentration between April 9, 2024, and March 20, 2025, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Kharkiv

за період дослідження у м. Харків. Ключовою причиною нерівномірності показників є вплив бойових дій на стан атмосферного повітря у місті. Саме після масованих ударів по інфраструктурі фіксувалися піки максимального забруднення. Ракетні обстріли, пожежі руйнованих будівель призводять до миттєвих викидів великої кількості дрібно-дисперсних часточок. Після пошкоджень комунікацій місто стикається з вимушеним використанням генераторів, що збільшує викиди від неповного згоряння палива. Руйнування доріг та будівельні роботи також підвищують пиловий фон.

Дані моніторингу дрібнодисперсних часток $PM_{2.5}$ у м. Кропивницький за квітень 2024 – березень 2025 рр. розкривають помірний, але неоднорідний стан якості атмосферного повітря (Рис. 3). Середньодобова концентрація (6,26 мкг/м³) дещо перевищує річний орієнтир ВООЗ, але значно нижча за показники прифронтових міст. Медіана (4,10 мкг/м³) підтверджує, що в більшості днів рівень забруднення залишався у безпечному діапазоні. Проте спорадичні піки до 87,00 мкг/м³ (у 17 разів вище за медіану) свідчать про періодичні кризові ситуації за

досліджуваний період. Статистичні показники, зокрема, коефіцієнт варіації (128%), показує помірну, але значну мінливість. Ситуація за показником $PM_{2.5}$ більш стабільна, ніж у прифронтових містах, але виражена асиметрія ($5,53 > 0$) підтверджує наявність рідкісних інтенсивних викидів, які «витягують» середнє значення вгору, дисперсія

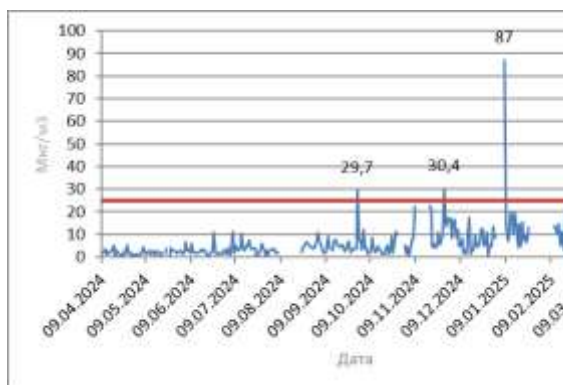


Рис. 3 – Розподіл концентрацій $PM_{2.5}$ у період з 09.04.2024 по 20.03.2025, mg/m^3 ,

м. Кропивницький

Fig. 3 – Distribution of $PM_{2.5}$ concentrations between April 9, 2024, and March 20, 2025, $\mu g/m^3$, Kropyvnytskyi

Дані моніторингу за квітень 2024 – березень 2025 рр. демонструють помірний рівень забруднення грубими частинками PM_{10} у Кропивницькому. Середньодобова концентрація ($12,03 \text{ } \mu g/m^3$) знаходиться у межах європейських норм ($50 \text{ } \mu g/m^3$), але перевищує річний орієнтир ВООЗ ($15 \text{ } \mu g/m^3$). Медіана ($8,60 \text{ } \mu g/m^3$) свідчить, що для більшості днів характерний низький фоновий рівень, значний масив даних $\approx 60\%$, знаходиться у діапазоні від 1,1 до $10 \text{ } \mu g/m^3$ і не ГДК ($40 \text{ } \mu g/m^3$).

Незначні перевищення за цим показником виявлені 4 жовтня (51,5), 8 та 28 листопада (41,5 та 57,9 відповідно) 2024 року та 7 березня 2025 року ($51,2 \text{ } \mu g/m^3$).

Помірна мінливість показника (коефіцієнт варіації складає 100%), вказує на стабільніші умови формування якості повітря ніж у прифронтових містах. Відносно слабка асиметрія (1,69) – екстремальні піки концентрацій PM_{10} трапляються рідше, ніж для $PM_{2.5}$. Стандартне відхилення 12,00 – типове для міст із переважанням автотранспортного та побутового забруднення (Рис.4).

(51,75) – значно нижча, ніж у зонах активних бойових дій, також вказує на періодичні явища, що порушують фоновий стан.

Кластери аномалій для $PM_{2.5}$ зафіксовані:

1. 30.09.2024 – $29,7 \text{ } \mu g/m^3$.
2. 28.11.2024 – $30,4 \text{ } \mu g/m^3$.
3. 08.01.2025 – $87 \text{ } \mu g/m^3$.



Рис. 4 – Розподіл концентрацій PM_{10} у період з 09.04.2024 по 20.03.2025, mg/m^3 ,

м. Кропивницький

Fig. 4 – Distribution of $PM_{2.5}$ concentrations between April 9, 2024, and March 20, 2025, $\mu g/m^3$, Kropyvnytskyi

На противагу прифронтовому Харкову, де переважають кризові джерела забруднення та спостерігаються регулярні екстремальні піки, у Кропивницькому фоновий рівень часток $PM_{2.5}$ і PM_{10} формують класичні міські джерела забруднення, а саме, транспорт та промисловість. Окремі кластери аномалій, кількість яких була значне меншою, ніж у Харкові, також пов'язані з наслідками повітряних атак.

Дані моніторингу за квітень 2024 – березень 2025 рр. демонструють стабільний радіаційний фон у Харкові в умовах воєнного стану, про що свідчать низькі значення коефіцієнта варіації (18%) та мінімальний розкид між середнім ($11,03 \text{ } \mu R/\text{год}$) і медіаною ($10,73 \text{ } \mu R/\text{год}$). Незважаючи на окремі піки до $20,27 \text{ } \mu R/\text{год}$, які незначно перевищують природний фон ($10\text{--}20 \text{ } \mu R/\text{год}$), мінімальне значення ($6,64 \text{ } \mu R/\text{год}$) підтверджує відсутність критичних відхилень (Рис. 5).

Дослідження радіаційного фону у Кропивницькому за період з квітня 2024 по березень 2025 року виявило високий рівень його стабільності. Середнє значення $16,35 \text{ } \mu R/\text{год}$

та медіана 16,22 мкР/год демонструють мінімальні відхилення від центральної тенденції, що свідчить про відсутність систематичних збурень. Надзвичайно низький коефіцієнт варіації (12%), який вказує на мінімальну мінливість показників. Маłe стандартне відхилення (2,00 мкР/год) підтверджує високу сталість радіаційного фону Коефіцієнт асиметрії 0,25 свідчить про практично ідеальний нормальний розподіл даних (Рис. 6).

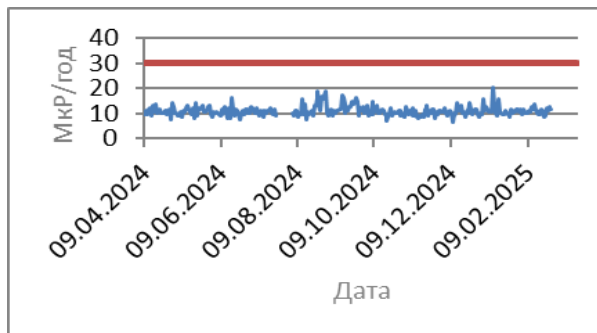


Рис. 5– Радіаційний фон у період з 09.04.2024–20.03.2025, мкР/год, м. Харків

Fig. 5 – Radiation background level during the period from 09.04.2024 to 20.03.2025, $\mu\text{R/h}$, Kharkiv

Дані моніторингу концентрації аміаку NH_3 за період спостережень виявляють, що значний масив даних ($\approx 75\%$) знаходиться у діапазоні від 0,03 до 0,16 мкг/м^3 , низька або помірна концентрація притаманна більшій половині вимірюваних даних та не перевищує ГДК – 40 мкг/м^3 .

Кластерів аномально високих значень не зафіксовано, проте відзначено зростання концентрації забруднюючого показника у такі періоди:

- з 24 по 30 серпня 2024 року: значення коливалися від 15,65 до 26,65 мкг/м^3 .
- з 13 по 17 вересня 2024 року: показники варіювалися від 13,37 до 15,66 мкг/м^3 .
- з 21 по 25 вересня 2024 року: концентрація становила від 11,47 до 19,43 мкг/м^3 .

(Рис. 7). Рівень варіації даних становить 485%, що свідчить про високу неоднорідність вибірки. Такий розкид обумовлений значним розбігом значень — від 0,03 мкг/м^3 до 26,62 мкг/м^3 , із різницею між мінімальним і максимальним показником у 26,59 мкг/м^3 . Високі значення дисперсії (19,46) та середньоквадратичного відхилення (6 мкг/м^3) підтверджують екстремальну розсіяність даних.

Порівняльний аналіз радіаційного фону Харкова та Кропивницького виявив, що максимуми обох міст не виходять за межі природного фону, радіаційна обстановка у містах є стабільною та безпечною. Кропивницький демонструє вищий середній фон (16,35 мкР/год) проти Харкова (11,03 мкР/год), що пов'язано з особливостями геологічної будови території, на якій розташований Кропивницький.

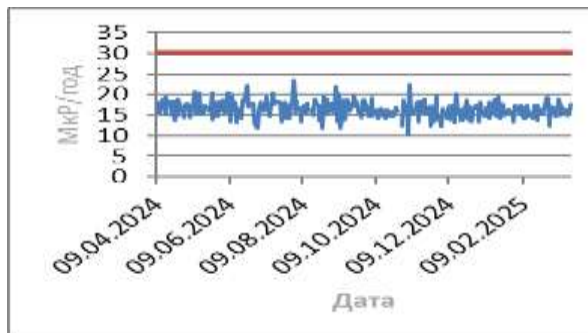


Рис. 6– Радіаційний фон у період з 09.04.2024–20.03.2025, мкР/год, м. Кропивницький

Fig. 6 – Radiation background level during the period from 09.04.2024 to 20.03.2025, $\mu\text{R/h}$, Kropyvnytskyi

Окремі результати вимірювань суттєво відрізняються від середньої величини, яка складає 1,24 мкг/м^3 . Коефіцієнт асиметрії 5,05 (>0) показує, що основна маса даних зосереджена в області низьких значень (медіана лише 0,11 мкг/м^3). В той же час існує декілька випадків високих значень, які «втягують» розподіл вправо. Короточасні різкі зростання можуть бути пов'язані з технологічними порушеннями, аварійними викидами з пошкоджених аміачних комунікацій внаслідок бойових дій.

Ці дані відображають новий тип екологічної загрози у воєнний час – епізодичні, але потужні хімічні викиди, що потребують спеціальних підходів до моніторингу та управління ризиками.

Дослідження концентрації діоксиду азоту (NO_2) у атмосферному повітрі проводилося протягом року – з 9 квітня 2024 по 20 березня 2025 року. Отримані дані дозволяють оцінити як середній рівень забруднення, так і динаміку коливань концентрацій цієї шкідливої речовини (Рис. 8). Середня концентрація NO_2 за вказаний період склала 23,69 мкг/м^3 , що незначно вище медіанного значення 22,58 мкг/м^3 . Така невелика різниця

між середнім і медіаною може свідчити про відносно симетричний розподіл даних без виражених викидів у той чи інший бік. Проте діапазон коливань концентрацій виявився досить значним – від мінімальних 5,48 мкг/м³ до максимальних 45,83 мкг/м³. Коефіцієнт варіації ($CV = 34\%$) підтверджує помірну мінливість рівнів забруднення протягом року.

Стандартне відхилення в 8,00 мкг/м³ підтверджує, що більшість значень групуються в межах ± 8 мкг/м³ від середнього

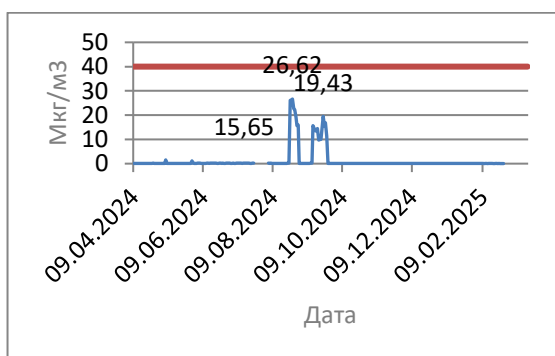


Рис. 7 – Розподіл концентрацій аміаку NH_3 у період з 09.04.2024–20.03.2025, мкг/м³, м. Харків

Fig. 7 – Distribution of ammonia NH_3 concentrations during the period from 09.04.2024 to 20.03.2025, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Kharkiv

кетних ударів, а саме, горіння палива ракет, руйнування інфраструктури можуть давати короточасні, але дуже високі піки концентрацій азотистих сполук, включаючи NO_2 .

За результатами моніторингу якості повітря протягом року спостерігалися характе

рівня, основний масив даних (75%) знаходиться у діапазоні від 5,48 до 31 мкг/м³, що демонструє низькі або помірні концентрації забруднюючої речовини, які не перевищують ГДК (40 мкг/м³).

Кластер аномального підвищення NO_2 виявлений 23.08.2024 року. Концентрація – 45,83 мкг/м³.

Висока дисперсія (55,09) і широкий діапазон коливань концентрацій (5,48–45,83 мкг/м³) можуть пояснюватися впливом на якість показників атмосферного повітря ра

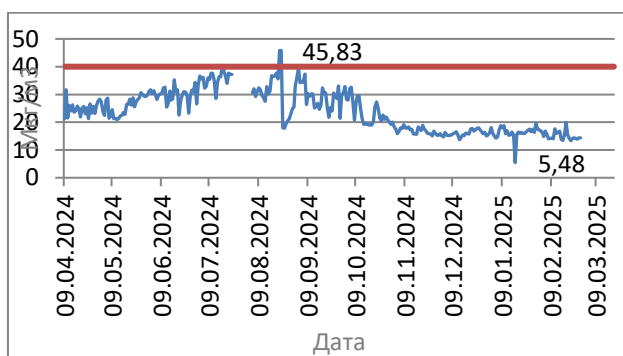


Рис. 8 – Розподіл концентрацій діоксиду азоту NO_2 , у період з 09.04.2024–20.03.2025, мкг/м³, м. Харків

Fig. 8 – Distribution of nitrogen dioxide NO_2 concentrations, during the period from 09.04.2024 to 20.03.2025, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Kharkiv

ристики розподілу концентрацій монооксиду вуглецю: середньорічний рівень CO склав 1,38 мкг/м³, при цьому медіанне значення (1,20 мкг/м³) виявилось дещо нижчим за середнє, що може вказувати на наявність періодів з підвищеними концентраціями (Рис. 9). Мініма-



Рис. 9 – Розподіл концентрацій оксиду вуглецю CO у період з 9 квітня 2024 по 20 березня 2025 року, мкг/м³, м. Харків

Fig. 9 – Distribution of carbon monoxide (CO) concentrations during the period from 09.04.2024 to 20.03.2025, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Kharkiv

льне значення ($0,40 \text{ мг/м}^3$) суттєво відрізняється від максимального ($2,63 \text{ мг/м}^3$), що свідчить про значну мінливість рівнів забруднення. Але основний масив індикативних вимірювань цього показнику ($\approx 75\%$) знаходиться у діапазоні від $1,2$ до $2,0 \text{ мг/м}^3$, та не перевищує норму ГДК – 3 мг/м^3 . Високий коефіцієнт варіації (145%) демонструє виражену нестабільність концентрацій СО протягом досліджуваного періоду. Стандартне відхилення ($2,00 \text{ мкг/м}^3$) та дисперсія ($0,26$) підтверджують значний розкид даних навколо середнього значення.

Висновки

Правові засади забезпечення моніторингу якості атмосферного повітря в Україні зазнали значного вдосконалення за останні п'ять років, що відповідає вимогам європейських стандартів, зокрема Директиви 2008/50/ЄС. Введення нових нормативних актів, таких як Постанова Кабінету Міністрів України № 827 від 14 серпня 2019 року та Наказ Міндовкілля № 147 від 2021 року, забезпечило гармонізацію національного законодавства з європейськими нормами, сприяючи стандартизації методик вимірювань, розміщенню пунктів спостереження та інтеграції сучасних інформаційно-аналітичних систем. Поєднання вимог Директиви 2008/50/ЄС та принципів Орхуської конвенції посилює громадський контроль за станом атмосферного повітря, сприяючи створенню незалежних моніторингових систем і підвищенню екологічної свідомості суспільства. Громадські моніторингові мережі, зокрема, EcoCity, довели свою ефективність у зборі даних у реальному часі, особливо в умовах війни. Ці мережі стали дієвим інструментом для оперативного визначення показників якості атмосферного повітря, зокрема в прифронтових містах, таких як Харків. Аналіз даних за період з квітня 2024 по березень 2025 року показав, що у Харкові спостерігаються різкі піки концентрацій $\text{PM}_{2.5}$ (до $188,7 \text{ мкг/м}^3$) та PM_{10} (до $198,9 \text{ мкг/м}^3$), пов'язані з бойовими діями, тоді як у Кропивницькому переважають класичні

Результат перевірки на нормальність розподілу ($0,35$) вказує, що розподіл даних наближається до нормального.

Мінливість концентрацій СО може бути пов'язана з впливом сезонності, метеорологічних умов, інтенсивністю автотранспорту, промисловими викидами, впливом бойових дій, зокрема, руйнування інфраструктури, пожежі тощо. Кластерів аномально високих значень концентрацій СО не виявлено, проте зафіксовано зниження концентрації цього забруднювача повітря у періоди з 24 по 31 серпня 2024 (від $0,41$ до $0,50 \text{ мг/м}^3$) та з 13 по 25 вересня 2024 від $0,43$ до $0,76 \text{ мг/м}^3$.

міські джерела забруднення ($\text{PM}_{2.5}$ до 87 мкг/м^3). Радіаційний фон у обох містах залишається стабільним і безпечним, хоча в Кропивницькому він дещо вищий ($16,35 \text{ мкР/год}$ проти $11,03 \text{ мкР/год}$ у Харкові) через геологічні особливості регіону.

Війна в Україні спричинила появу нового типу забруднення повітря, що характеризується короточасними, але інтенсивними викидами, особливо у прифронтових зонах. Концентрації NO_2 у Харкові демонструють різкі зростання (до $45,83 \text{ мкг/м}^3$) тривалістю 2–5 діб, що пов'язано з бойовими діями, тоді як мінливість концентрацій СО зумовлена сезонними, метеорологічними та антропогенними факторами. Аміак (NH_3) у Харкові також показує епізодичні підвищення, що можуть бути спричинені аварійними викидами через пошкодження інфраструктури.

Таким чином, індикативні вимірювання на основі громадських мереж є важливим інструментом для оцінки якості атмосферного повітря в умовах війни. Вони дозволяють оперативно виявляти аномалії та надавати дані для прийняття управлінських рішень. Подальший розвиток правового та технічного забезпечення моніторингу, а також інтеграція громадських і державних систем, сприятимуть підвищенню ефективності контролю за станом атмосферного повітря в Україні, особливо в умовах воєнного часу.

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.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи: Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text (дата звернення: 20.07.2025).
2. Гололобова О., Дамбраускас В., Комар С. Правове забезпечення державного моніторингу якості атмосферного повітря в Україні. *Актуальні проблеми формальної і неформальної освіти з моніторингу довкілля та заповідної справи* : тези доповідей IV Міжнародної Інтернет-конференції (м. Харків, 18 квітня 2025 року). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. С. 86–90. URL: <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2025/04/akt-probl-form-i-neform-osv-z-monit-dovk-ta-zapov-spr-2025.pdf>
3. Zalakeviciute R., Mejia D., Alvarez H., Bermeo X., Bonilla-Bedoya S., Rybarczyk Y., Lamb B. War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*. 2022. Т. 14, № 21. С. 13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>
4. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Korchevyy O., Bazylevych N., Hryhorczuk A., Epperly T. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024. Т. 19. С. 2. <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>
5. Leal Filho W., Eustachio J. H. P. P., Fedoruk M., Lisovska T. War in Ukraine: an overview of environmental impacts and consequences for human health. *Frontiers in Sustainable Resource Management*. 2024. Т. 3. <https://doi.org/10.3389/fsrma.2024.1423444>
6. Hanoshenko O., Halaktionov M., Huber-Humer M. Exploratory study on the impact of military actions on the environment and infrastructure in the current Ukraine war with a specific focus on waste management. *Waste Management & Research*. 2025. Т. 43, № 8. С. 1245–1259. <https://doi.org/10.1177/0734242X241305909>
7. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря: Постанова Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 № 827. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
8. Про затвердження Порядку розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях: Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 21.04.2021 року № 300. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0635-21#Text> (дата звернення: 20.07.2025)
9. Про затвердження форми Програми державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря : Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України № 147 від 2021 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0543-21#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
10. Kuula J., Mäkelä T., Aurela M., Teinilä K., Varjonen S., González Fernández Ó., Timonen H. Size-resolved field performance of low-cost sensors for particulate matter air pollution. *Environmental Science & Technology Letters*. 2023. Т. 10, № 3. С. 247–253. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00030>
11. Hofman J., Peters J., Stroobants C., Elst E., Baeyens B., Van Laer J., Spruyt M., Van Essche W., Delbare E., Roels B., Cochez A., Gillijns E., Van Poppel M. Air Quality Sensor Networks for Evidence-Based Policy Making: Best Practices for Actionable Insights. *Atmosphere*. 2022. Т. 13. № 6. С. 944. <https://doi.org/10.3390/atmos13060944>
12. Про Єдину екологічну платформу «ЕкоСистема»: Постанова Кабінету Міністрів України від 11.10.2021 № 1065. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1065-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
13. Про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля. Орхуська Конвенція від 06.07.1999 р. Дата оновлення: 27.05.2005. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_015#Text (дата звернення: 20.07.2025).
14. Eco-City Громадський моніторинг стану якості повітря. URL: <https://eco-city.org.ua/> (дата звернення : 17.07.2025).
15. SaveDnipro - Громадська організація «SaveDnipro». URL: <https://www.savednipro.org/> (дата звернення : 17.07.2025).
16. Чисте повітря для України. URL: cleanair.org.ua (дата звернення: 17.07.2025).
17. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 10.05.2024 № 813. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0763-24#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
18. Громадський моніторинг якості повітря: переваги та процедура інтеграції в існуючу моніторингову систему. URL: <https://ecolog-ua.com/news/gromadskyy-monitoryng-yakosti-povityrya-perevagy-ta-procedura-integraciyi-v-isnuyuchu>
19. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата звернення: 20.07.2025).
20. Ліхоузова Т.А. Теорія імовірностей та математична статистика. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 300 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/20037ecb-78e3-4fa6-9bfe-42dbcedc38e8/content>

Стаття надійшла до редакції 28.07.2025

Переглянуто 18.09.2025

Стаття рекомендована до друку 20.09.2025

Опубліковано 30.12.2025

O. O. GOLOLOBOVA¹, PhD (Agriculture),
Associate Professor of the Department of Environmental Monitoring and Protected Area
e-mail: elena.gololobova@karazin.ua ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5558-2114>

T. S. RIEZNIK¹,
Bachelor
e-mail: rieznik2021.9512125@student.karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-5154-3117>

V. O. DAMBRAUSKAS¹,
Bachelor
e-mail: valentyna.dambrauskas@student.karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0459-0268>

S. R. KOMAR¹,
Bachelor
e-mail: sofiia.komar@student.karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-9709-3034>

¹V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

INDICATIVE MEASUREMENTS OF AIR POLLUTION IN UKRAINE WITHIN THE LIMITS OF LEGAL HARMONIZATION WITH EUROPEAN STANDARDS (USING THE EXAMPLE OF KHARKIV AND KROPYVNYTSKY CITIES)

Purpose. To analyze the legal basis for indicative measurements of air quality in Ukraine and assess their effectiveness using the example of the cities of Kharkiv and Kropyvnytskyi in 2024–2025, taking into account the impact of military conditions.

Methods. System analysis, statistical.

Results. Compliance of national legislation with the requirements of Directive 2008/50/EC on indicative measurements of ambient air quality has been established. The EcoCity public network has become an effective tool for collecting data on ambient air quality in wartime. The study revealed significant differences in air quality between Kharkiv and Kropyvnytskyi due to the impact of hostilities. In Kharkiv, sharp peaks in PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations were recorded, while in Kropyvnytskyi, traditional sources of pollution, in particular, transport and industry, with moderate PM_{2.5} indicators, prevail. The radiation background in both cities remained stable and safe, not exceeding the natural background. In Kropyvnytskyi, the average radiation background is higher than in Kharkiv, which is due to the geological features of the territory. In Kharkiv, short-term increases in NO₂ concentration lasting 2–5 days, typical of combat zones, were recorded. The variability of CO concentrations in Kharkiv is associated with seasonal factors, meteorological conditions, traffic intensity, industrial emissions and the impact of hostilities.

Conclusions. The legal framework for monitoring ambient air quality in Ukraine has been significantly improved over the past five years in accordance with European standards, in particular Directive 2008/50/EC. Military operations have caused a new type of air pollution with short-term but intense emissions, especially in frontline cities such as Kharkiv. Indicative measurements implemented through public networks, in particular EcoCity, have proven to be an effective tool for quickly determining air quality indicators in wartime.

KEY WORDS: *air quality monitoring, environmental legislation, indicative measurement, EcoCity public network*

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the authors have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. European Parliament & Council of the European Union. (2008, May 21). On ambient air quality and cleaner air for Europe (Directive 2008/50/EC). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text (in Ukrainian)
2. Gololobova, O., Dambrauskas, V., & Komar, S. (2025). Legal support of state monitoring of atmospheric air quality in Ukraine. *Actual problems of formal and non-formal education in environmental monitoring and reserve management*: Proceedings of the IV International Internet Conference, Kharkiv, April 18, 2025, 86–

90. V. N. Karazin Kharkiv National University. Retrieved from <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2025/04/akt-probl-form-i-neform-osv-z-monit-dovk-ta-zapov-spr-2025.pdf> (in Ukrainian)
3. Zalakeviciute, R., Mejia, D., Alvarez, H., Bermeo, X., Bonilla-Bedoya, S., Rybarczyk, Y., & Lamb, B. (2022). War impact on air quality in Ukraine. *Sustainability*, 14(21), Article 13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>
4. Hryhorczuk, D., Levy, B. S., Prodanchuk, M., Korchevyy, O., Bazylevych, N., Hryhorczuk, A., & Epperly, T. (2024). The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 19(1), Article 2. <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>
5. Leal Filho, W., Eustachio, J. H. P. P., Fedoruk, M., & Lisovska, T. (2024). War in Ukraine: An overview of environmental impacts and consequences for human health. *Frontiers in Sustainable Resource Management*, 3, Article 1423444. <https://doi.org/10.3389/fsrma.2024.1423444>
6. Hanoshenko, O., Halaktionov, M., & Huber-Humer, M. (2025). Exploratory study on the impact of military actions on the environment and infrastructure in the current Ukraine war with a specific focus on waste management. *Waste Management & Research*, 43(8), 1245–1259. <https://doi.org/10.1177/0734242X241305909>
7. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2019, August 14). On some issues of state monitoring in the field of atmospheric air protection (Resolution No. 827). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-n#Text> (in Ukrainian)
8. Ministry of Internal Affairs of Ukraine. (2021, April 21). On approval of the Procedure for placement of atmospheric air pollution observation points in zones and agglomerations (Order No. 300). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0635-21#Text> (in Ukrainian)
9. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2021). On approval of the form of the State Monitoring Program in the field of atmospheric air protection (Order No. 147). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0543-21#Text> (in Ukrainian)
10. Kuula, J., Mäkelä, T., Aurela, M., Teinilä, K., Varjonen, S., González Fernández, Ó., & Timonen, H. (2023). Size-resolved field performance of low-cost sensors for particulate matter air pollution. *Environmental Science & Technology Letters*, 10(3), 247–253. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00030>
11. Hofman, J., Peters, J., Stroobants, C., Elst, E., Baeyens, B., Van Laer, J., Spruyt, M., Van Essche, W., Delbare, E., Roels, B., Cochez, A., Gillijns, E., & Van Poppel, M. (2022). Air Quality Sensor Networks for Evidence-Based Policy Making: Best Practices for Actionable Insights. *Atmosphere*, 13(6), 944. <https://doi.org/10.3390/atmos13060944>
12. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021, October 11). On the Unified Environmental Platform "EcoSystem" (Resolution No. 1065). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1065-2021-%D0%BF#Text> (in Ukrainian)
13. UNECE. (1999, June 25). Convention on access to information, public participation in decision-making and access to justice in environmental matters (Aarhus Convention). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_015#Text
14. Eco-City. (n.d.). Public monitoring of air quality. Retrieved from <https://eco-city.org.ua/> (in Ukrainian)
15. SaveDnipro. (n.d.). SaveDnipro – Public organization "SaveDnipro". Retrieved from <https://www.savednipro.org/> (in Ukrainian)
16. Clean Air for Ukraine. (n.d.). Clean air for Ukraine. Retrieved from <https://cleanair.org.ua> (in Ukrainian)
17. Ministry of Health of Ukraine. (2024, May 10). On approval of state sanitary standards for permissible levels of chemical and biological substances in ambient air of populated areas (Order No. 813). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0763-24#Text> (in Ukrainian)
18. Public air quality monitoring: Advantages and integration procedure into existing monitoring systems. (n.d.). Retrieved from <https://ecolog-ua.com/news/gromadskyy-monitoryng-yakosti-povitrya-perevagy-ta-procedura-integraciyi-v-isnuyuchu> (in Ukrainian)
19. World Health Organization. (n.d.). Ambient (outdoor) air pollution. Retrieved from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
20. Likhousova, T. A. (2018). Probability theory and mathematical statistics: Lecture course. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/20037ecb-78e3-4fa6-9bfe-42dbcedc38e8/content> (in Ukrainian)

The article was received by the editors 11.09.2025
The article is recommended for printing 22.10.2025

The article was revised 18.10.2025
This article published 30.12.2025