

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ УРБОЕКОСИСТЕМ ВЕЛИКИХ МІСТ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ ТА GIS-МОДЕЛЮВАННЯ

Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація

У роботі узагальнено сучасні дані про стан урбоекосистем великих міст України на основі супутникових оцінок, наземного моніторингу та GIS-моделювання. Показано, що у промислово розвинених регіонах рівні $PM_{2.5}$ часто перевищують рекомендації ВООЗ, а основними джерелами забруднення залишаються транспорт і промислові об'єкти. Інтегральні індекси та просторовий аналіз дозволяють визначити ділянки підвищеної екологічної небезпечності та можуть бути використані для обґрунтування пріоритетних природоохоронних заходів.

Ключові слова: урбоекосистема; екологічна безпека; атмосферне повітря; дрібнодисперсні частинки; інтегральний індекс; GIS-моделювання; техногенне навантаження.

Abstract:

This work summarizes current data on the state of urban ecosystems in large Ukrainian cities based on satellite observations, ground air-quality measurements, and GIS modeling. It is shown that $PM_{2.5}$ levels in industrial regions frequently exceed WHO guidelines, with transport and industry being the main pollution sources. Integral indices combined with spatial analysis help identify high-risk urban areas and support prioritization of environmental mitigation measures.

Keywords: urban ecosystem; environmental safety; atmospheric air; fine particulate matter; integral index; GIS modeling; anthropogenic load.

Вступ

Екологічна безпека урбоекосистем великих міст України в останні роки розглядається як один із ключових елементів сталого розвитку, оскільки саме густонаселені території формують значну частку викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря та забезпечують основний внесок у довготривалу експозицію населення до дрібнодисперсних частинок, оксидів азоту, діоксиду сірки, летких органічних сполук та інших полутантів. Узагальнені оцінки, виконані на основі глобального індикатора ЦСР 11.6.2 («Середньорічні рівні $PM_{2.5}$ та PM_{10} у містах»), показали, що у період 2018–2023 рр. середньорічні концентрації PM_{10} та $PM_{2.5}$ в українських містах загалом не перевищували граничні значення, встановлені Директивою 2008/50/ЄС ЄС [1], проте залишалися вищими за більш жорсткі рекомендації ВООЗ, а найбільш високі рівні спостерігалися саме у великих міських агломераціях. Це свідчить про те, що формально нормативні вимоги часто виконуються, але реальний ризик для здоров'я населення з точки зору сучасних медико-гігієнічних критеріїв залишається суттєвим.

Паралельно із супутниковими оцінками розвиваються локальні та національні системи моніторингу, включаючи державні пости спостережень, громадські та приватні датчики, інтегровані у такі платформи, як SaveEcoBot, AQICN, IQAir тощо, що забезпечує майже режим реального часу для контролю якості повітря в десятках міст України [2]. Узагальнення цих даних у поєднанні з геоінформаційними технологіями створює підґрунтя для побудови просторових моделей, які відображають не тільки середні по місту значення, а й реальну картину «плям» забруднення, пов'язаних із транспортними коридорами, промисловими вузлами та особливостями міської забудови. Сучасні дослідження українських авторів демонструють активне використання GIS-моделювання для статистичного та картографічного опису розподілу домішок у повітрі у таких містах, як Харків, Кривий Ріг, Житомир та інші індустріальні центри.

Узгоджений аналіз цих джерел дає змогу сформуванню цілісного уявлення про поточний рівень екологічної безпеки урбоекосистем в Україні, оцінити структуру техногенного навантаження, а також

обґрунтувати доцільність застосування інтегральних індексів і GIS-моделей як базових інструментів прийняття рішень у сфері екологічного та містобудівного управління.

Результати дослідження

За даними супутникового аналізу дрібнодисперсних частинок, виконаного в рамках проєктів з оцінювання якості повітря в Україні, встановлено, що довгострокові середньорічні концентрації $PM_{2.5}$ є найвищими в індустріально розвинених регіонах: Донецькій області (приблизно $11,9 \text{ мкг/м}^3$), Дніпропетровській області (близько $10,9 \text{ мкг/м}^3$), місті Києві (близько $10,8 \text{ мкг/м}^3$) та Запорізькій області (понад $10,1 \text{ мкг/м}^3$). У низці районів ці показники не відповідають рекомендаціям ВООЗ, де орієнтовний рівень для середньорічного $PM_{2.5}$ становить 10 мкг/м^3 . Виконана у 2021 р. оцінка SDG-індикатора 11.6.2 для українських міст підтвердила, що саме великі міські центри забезпечують основний внесок у загальнонаціональний рівень забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсними частинками [3].

Лабораторні й інструментальні вимірювання, виконані у Києві, Харкові та Львові з використанням лазерних моніторів у 2016–2017 рр., показали, що епізодичні пікові концентрації $PM_{2.5}$ та PM_{10} у придорожніх зонах можуть суттєво перевищувати європейський стандарт 25 мкг/м^3 (для добового середнього), а для окремих точкових вимірювань – перевищувати його у кілька разів. Окремі роботи, присвячені наслідкам ракетних та дронівих атак, демонструють, що в умовах воєнних дій можливі короточасні, але екстремально високі концентрації $PM_{2.5}$, які у Києві на початку повномасштабної агресії сягали понад 20-кратного перевищення добових рекомендацій ВООЗ через масштабні пожежі та руйнування інфраструктури. Хоча такі події мають епізодичний характер, вони істотно впливають на сумарну річну експозицію для населення.

Серія досліджень, виконаних із використанням просторового моделювання в GIS-середовищі, показала, що характер розподілу забруднювачів у межах міста має виразно структурований вигляд. Наприклад, у Харкові статистичне та картографічне моделювання продемонструвало формування осередків підвищених концентрацій NO_2 , пилу та інших домішок у зонах перетину магістральних вулиць, поблизу великих транспортних розв'язок і промислових майданчиків, тоді як у районах із відносно низькою щільністю забудови та більш розвинутою зеленою інфраструктурою концентрації є помітно нижчими. Аналогічні просторові закономірності зафіксовано й у західних регіонах країни, де оцінка техногенного навантаження на повітряний басейн показала найвищі рівні викидів в Івано-Франківській та Львівській областях, тоді як найнижчі – у Чернівецькій [4].

Особливого значення набуває поєднання фактичних вимірювань із інтегральними індексами забруднення, які дозволяють перетворити сукупність різнотипних показників ($PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , CO , формальдегід тощо) у єдину узагальнену оцінку небезпечності для конкретної території. У низці українських і європейських робіт інтегральний індекс обчислювався як сума або середньозважене часткових безрозмірних показників, які є відношенням фактичної концентрації до нормативної (ГДК, стандарту ЄС або орієнтиру ВООЗ). При цьому для типової урбанізованої території великого українського міста інтегральні індекси, як правило, вказують на помірний або підвищений рівень екологічної небезпечності: для центральних районів, обтяжених транспортним навантаженням, узагальнені значення часто перевищують умовно безпечний рівень у 1,5–2,5 рази, тоді як у периферійних та зелено-рекреаційних зонах вони наближаються до одиниці або залишаються трохи вище неї.

Узагальнюючи наявні кількісні оцінки, можна виділити типові інтервали інтегральних показників забруднення для різних функціональних зон міста, що відображають стійкі просторові закономірності формування техногенного навантаження. Таке групування дозволяє оцінити не лише поточний стан, але й потенційні зміни у разі трансформації міської інфраструктури. Значення наведено орієнтовно, за даними супутникових, наземних та індикаторних досліджень (таблиця 1.1).

Такі інтервали добре узгоджуються із супутниковими оцінками просторового розподілу $PM_{2.5}$, даними громадських систем моніторингу та регіональними дослідженнями техногенного навантаження на повітряний басейн [5]. Вони підтверджують, що ключовими факторами формування екологічного ризику в українських містах залишаються транспорт, енергетика та промисловість, а застосування інтегральних індексів і GIS-моделювання дозволяє не лише зафіксувати наявний стан, але й виявити просторові тренди, важливі для подальшого екологічного планування.

Таблиця 1. Узагальнені результативні показники сучасних досліджень урбоєкосистем

Тип міської зони	Характеристика джерел	Орієнтовний інтегральний індекс (відн. од.)
Центральні транспортні коридори	інтенсивний рух, світлофори, перехрестя	1,8–2,5
Промислово-міські вузли	енергетика, металургія, переробка, логістика	1,6–2,2
Щільна житлова забудова без зелених коридорів	локальний транспорт, низька вентиляція	1,3–1,8
Зони змішаної забудови з парками	житлова + офісна забудова, наявні зелені масиви	1,1–1,4
Периферійні та рекреаційні території	низьке транспортне навантаження, домінують природні ландшафти	0,8–1,2

Висновки

Узагальнення доступних супутникових, наземних та геоінформаційних досліджень демонструє, що урбоєкосистеми великих міст України характеризуються стійким техногенним навантаженням, при якому середньорічні концентрації дрібнодисперсних частинок у ряді регіонів перевищують рекомендації ВООЗ, хоча в більшості випадків залишаються нижчими за формальні нормативи ЄС. Реальні дані по Києву, Харкову, Львову та іншим індустріальним центрам свідчать про існування періодичних епізодів різкого зростання рівня $PM_{2.5}$ та PM_{10} , особливо в зонах інтенсивного транспортного руху та в умовах воєнних дій, що підсилює медико-екологічний ризик для населення.

Роботи, засновані на GIS-моделюванні, переконливо показують, що забруднення атмосферного повітря має виразно просторово структурований характер: найбільш високі значення інтегральних індексів спостерігаються у транспортних коридорах та промислових вузлах, тоді як периферійні й рекреаційні зони з розвиненою зеленою інфраструктурою демонструють суттєво нижчий рівень небезпечності. Це підтверджує необхідність урахування планувальної структури міст та ролі зелених коридорів при розробленні стратегій зниження техногенного навантаження.

З позицій екологічної інженерії інтегральні індекси забруднення і GIS-моделі доцільно розглядати як базові інструменти підтримки прийняття рішень, що дозволяють кількісно оцінювати ефективність природоохоронних та містобудівних заходів, моделювати сценарії розвитку урбоєкосистем та обґрунтовувати правила використання територій. Подальший розвиток таких підходів в Україні, зокрема розширення мережі відкритих датчиків, удосконалення національних кадастрів викидів та інтеграція даних у єдині цифрові платформи, є необхідною умовою для підвищення рівня екологічної безпеки великих міських агломерацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гринчишин Н. Н. Якість атмосферного повітря за вмістом твердих мікрочастинок ($PM_{2.5}$) в містах України в умовах карантину та воєнного стану / Grynychyshyn N. N. // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2023. – Вип. 27. – С. 47.
2. Бутенко О. Г., ін. Просторовий розподіл забруднення атмосферного повітря в Україні: картографічне моделювання та регіональна оцінка / Butenko O. H. et al. // REKS – Радіоекологія та безпека. – 2023. – № 323. – С. 62.
3. Шелестов А. В. Air Quality Estimation in Ukraine Using SDG 11.6.2 / Shelestov A. V., Skorokhod A. A., Serhiyenko O. I. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2021. – № дистанційне видання. – Режим доступу: PDF
4. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Стан забруднення атмосферного повітря в Україні: офіційні щорічні звіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua>
5. SaveEcoBot. Система онлайн-моніторингу якості повітря в Україні (дані громадських та офіційних станцій) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://saveecobot.com>

Назаренко Ілона Павлівна — студент групи ТЗД-24м, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: malisocsforey33@gmail.com

Цимбалюк Олександр Петрович — студент групи ТЗД-24м, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: sasha_1989@ukr.net

Науковий керівник: **Петрук Роман Васильович** — професор кафедри ЕЕБ, д.т.н, провідний н.с., Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Nazarenko Iona Pavlivna — student of the TZD-24m group, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: malisocsforey33@gmail.com

Tymbalyuk Oleksandr Petrovych — student of the TZD-24m group, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sasha_1989@ukr.net

Scientific Advisor: **Roman Vasylovych Petruk** — Professor of the Department of Ecology and Environmental Safety, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia