

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДОЛОГІЇ РОЗРАХУНКУ КОМПЛЕКСНОГО ІНДЕКСУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ТА НАПРЯМИ ЙОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ В УКРАЇНІ

Іваненко М.К., Притула Н.М.

Запорізький національний університет
вул. Гоголя, 62, 69600, м. Запоріжжя

ivanenkom2000@gmail.com, prytulanataliam@gmail.com

У статті здійснено критичний аналіз Комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА), який широко застосовується в Україні для оцінки якості атмосферного повітря. Наведено аргументи щодо неадекватності методології розрахунку індексу та його обмеженої здатності відображати реальний стан забруднення у містах з різним індустриальним навантаженням. Підкреслено, що КІЗА базується на сукупному врахуванні лише кількох пріоритетних речовин, при цьому набір цих речовин різниться залежно від міста, що унеможливорює порівнянність даних між регіонами. Окрім того, індекс не враховує комбіновану токсичну дію забруднювачів та ігнорує наявність порогових значень (гранично допустимих концентрацій), що суперечить базовим принципам гігієнічного нормування.

Наголошено також на відсутності стандартизованих порогових меж, що дозволили б класифікувати рівень забруднення як допустимий, середній чи критичний. Внаслідок цього КІЗА є інформативно обмеженим для прийняття рішень у сфері охорони здоров'я та планування природоохоронних заходів.

Як альтернативу запропоновано застосовувати підходи, орієнтовані на оцінку ризиків для здоров'я населення, зокрема методику визначення індексу ризику з урахуванням токсичності кожного інгредієнта. Розглянуто приклади використання просторового моделювання розподілу забруднювачів за допомогою геоінформаційних систем, а також значення метеорологічної нормалізації концентрацій для коректного аналізу довготривалих трендів забруднення.

У результаті дослідження запропоновано рекомендації щодо вдосконалення системи моніторингу якості повітря в Україні: перегляд методології КІЗА, її уніфікація на національному рівні, запровадження просторово-часових моделей, формалізація порогових меж та інтеграція підходів оцінки ризиків. Такий підхід дозволить підвищити точність та об'єктивність оцінки стану атмосферного повітря та забезпечить підґрунтя для ефективного управління екологічною безпекою. *Ключові слова:* атмосферне повітря; моніторинг; КІЗА; індекс ризику; просторове моделювання.

Critical analysis of the methodology for calculating the Complex Air Pollution Index and directions for its improvement in Ukraine. Ivanenko M., Prytula N.

The article presents a critical analysis of the Complex Air Pollution Index (CAPI), which is widely used in Ukraine to assess the quality of ambient air. The authors highlight methodological flaws in the index's calculation and its limited capacity to reflect the real state of pollution in cities with diverse industrial burdens. The CAPI considers only a limited number of key pollutants, which vary between cities, rendering comparisons across regions scientifically invalid. Moreover, the index does not account for the combined toxic effects of pollutants and disregards threshold values (maximum permissible concentrations), contradicting the basic principles of hygienic regulation.

The study also draws attention to the lack of standardized classification thresholds, which would allow the pollution level to be evaluated as acceptable, moderate, or critical. Consequently, the CAPI lacks informative value for public health decision-making and environmental policy development.

As an alternative, the article suggests applying health risk-oriented approaches, particularly the use of risk index calculation that incorporates the toxicity of each pollutant. Examples are provided of spatial modelling of pollutant distribution using geographic information systems (GIS), as well as the importance of meteorological normalization of concentrations for the accurate analysis of long-term pollution trends.

Based on the findings, the authors recommend several improvements to Ukraine's air quality monitoring system: revising the CAPI methodology, unifying it at the national level, introducing spatial-temporal models, formalizing threshold categories, and integrating health risk assessment techniques. This integrated approach will enhance the accuracy and objectivity of air quality assessments and provide a scientific basis for efficient environmental safety management. *Key words:* ambient air; monitoring; CAPI; risk index; spatial modelling.

Постановка проблеми. Забруднення атмосферного повітря є одним із найсерйозніших екологічних викликів сучасності, що безпосередньо впливає на здоров'я населення та стійкість природних систем. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я

(ВООЗ), у 2019 році вплив забрудненого повітря спричинив близько 4,2 мільйона передчасних смертей у світі, з них значна частка припала на країни Європи та Центральної Азії [2]. В Україні проблема забруднення повітря також є гострою: за даними

Програми розвитку ООН, середньорічна концентрація дрібнодисперсних частинок ($PM_{2.5}$) у великих містах перевищує гранично допустимі рівні, а кількість передчасних смертей, пов'язаних із цим фактором, оцінюється у понад 40 тисяч на рік [3].

Актуальність дослідження. В умовах посилення антропогенного тиску на довкілля особливого значення набуває ефективна система моніторингу якості атмосферного повітря. Її основне завдання полягає не лише у фіксації концентрацій забруднювальних речовин, а й у формуванні узагальнених індикаторів, що дозволяють швидко оцінити екологічну ситуацію та приймати відповідні управлінські рішення. Одним із таких індикаторів в Україні є Комплексний індекс забруднення атмосфери (КІЗА), що використовується Державною гідрометеорологічною службою як узагальнений показник рівня забруднення повітря у містах [1].

Інтегративний характер КІЗА дозволяє формально зіставляти стан повітря в різних населених пунктах на основі концентрацій низки хімічних речовин. Проте, попри поширене застосування, індекс має суттєві методологічні обмеження, що знижують його достовірність та корисність для стратегічного екологічного планування. Зокрема, КІЗА не враховує просторових і часових змін у забрудненні, комбінованої дії речовин, відмінностей у токсичності, а також часто базується на різному наборі домішок у різних містах. Крім того, в існуючій практиці немає чітко визначених порогових категорій індексу, що ускладнює його інтерпретацію для прийняття практичних рішень.

Таким чином, постає необхідність у критичному аналізі підходу до застосування КІЗА в Україні та пошуку альтернатив, які дозволили б здійснювати більш об'єктивну, науково обґрунтовану та функціональну оцінку якості атмосферного повітря.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Метою дослідження є критичне осмислення наукової та прикладної доцільності використання Комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА) як основного індикатора оцінки якості повітря в містах України, а також обґрунтування потреби у вдосконаленні методичних підходів до моніторингу стану атмосферного повітря.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні **завдання дослідження**:

1. Проаналізувати теоретичні засади, структуру та практику застосування КІЗА в національній системі моніторингу довкілля.

2. Визначити ключові методологічні недоліки індексу, зокрема його варіативність за складом речовин, нечіткість порогових категорій та ігнорування комбінованої дії забруднювачів.

3. Оцінити відповідність КІЗА сучасним підходам до оцінки ризиків для здоров'я населення та екологічної безпеки.

4. Описати перспективні альтернативи КІЗА: підходи на основі оцінки здоров'я-ризиків, просторового моделювання та метеорологічної корекції.

5. Сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо вдосконалення методичних підходів до інтегральної оцінки якості атмосферного повітря в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика оцінки якості атмосферного повітря за допомогою інтегральних індексів є предметом активного наукового обговорення як в Україні, так і за кордоном. У вітчизняних дослідженнях комплексний індекс забруднення атмосфери (КІЗА) традиційно розглядається як базовий інструмент державного моніторингу (напр., праці Державної гідрометеорологічної служби України). Водночас останні роки засвідчили зростаючий інтерес до критичної оцінки його методологічних основ та прикладної ефективності.

Зокрема, Rybalova та ін. (2022) проаналізували обмеження КІЗА в контексті виявлення пріоритетних забруднювачів у промислово навантажених регіонах і показали доцільність використання індексів ризику, що враховують токсичність речовин. У свою чергу, Maksymenko et al. (2024) продемонстрували ефективність геоінформаційного просторового моделювання для деталізації зон перевищення концентрацій та встановлення просторових закономірностей забруднення.

Міжнародні дослідження також акцентують на необхідності метеорологічної нормалізації даних задля виявлення довготривалих трендів. Зокрема, у роботі Qiu et al. (2022) обґрунтовано застосування методів машинного навчання для декомпозиції часових рядів забруднення з урахуванням впливу погодних умов, що забезпечує більш точну інтерпретацію екологічних змін.

Незважаючи на наявні наукові напрацювання, в українському контексті недостатньо реалізовано інтеграцію ризик-орієнтованих моделей, просторових підходів та нормалізаційних методів у державній системі моніторингу. Це обумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на оновлення концептуальних та методичних засад оцінки якості повітря.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Застосування КІЗА у практиці екологічного моніторингу має низку суттєвих обмежень:

1. **Нерівномірність складу індексу за містами.** У різних населених пунктах для обчислення КІЗА враховується різна кількість домішок – від 3 до 11 речовин, залежно від доступності даних [1]. Це означає, що КІЗА не є стандартизованим показником і не дозволяє здійснювати повноцінне порівняння рівнів забруднення між містами. Наприклад, в одному місті домінуючими є пилоподібні фракції та діоксид азоту, а в іншому – формальдегід і бензол, однак загаль-

ний індекс може бути однаковим, попри відмінності у токсичності.

2. Відсутність порогових категорій. Наразі у чинних документах немає офіційно визначених меж для інтерпретації значень КІЗА. Це унеможливує класифікацію рівня забруднення як «низький», «помірний», «високий» тощо, що, у свою чергу, ускладнює комунікацію з громадськістю та розробку управлінських заходів.

3. Ігнорування комбінованої дії речовин. Методологія КІЗА ґрунтується на припущенні про лінійне адитивне поєднання впливів окремих речовин. Водночас численні токсикологічні дослідження свідчать про наявність синергічних або антагоністичних ефектів, що виникають при взаємодії забруднювачів у повітряному середовищі [5]. Такий підхід не дозволяє коректно оцінити реальний екологічний і гігієнічний ризик.

4. Ігнорування часового фактору. КІЗА зазвичай розраховується на основі середньорічних або середньомісячних концентрацій, що приховує пікові забруднення, які можуть мати значні гострі ефекти на здоров'я населення.

5. Загалом ці обмеження ставлять під сумнів ефективність КІЗА як інструмента для стратегічного екологічного планування та охорони здоров'я.

Новизна. Проведено комплексну критичну оцінку методології Комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА), що використовується в Україні, з акцентом на її невідповідність сучасним науковим підходам до оцінки якості повітря. Запропоновано інтеграцію ризик-орієнтованих підходів, просторового моделювання та метеорологічної нормалізації як перспективні напрями вдосконалення системи моніторингу. Сформульовано конкретні рекомендації щодо уніфікації індексу, встановлення порогових категорій та врахування комбінованої дії забруднювачів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження критично переосмислює підходи до інтегральної оцінки якості атмосферного повітря, які застосовуються в Україні. Запропоновані напрями вдосконалення – уніфікація складу індексу, введення порогових категорій, інтеграція оцінки ризиків і просторово-часове моделювання – відповідають сучасним міжнародним стандартам моніторингу довкілля.

Виклад основного матеріалу. Комплексний індекс забруднення атмосфери (КІЗА) є узагальненим показником, який формується шляхом об'єднання відносних концентрацій кількох забруднювальних речовин, що переважно перевищують гігієнічні нормативи у конкретному місті [3]. Основою розрахунку КІЗА є формула, яка включає середні концентрації n домішок, нормовані за гранично допустимими концентраціями (ГДК) і ваговими коефіцієнтами, що відображають ступінь їхньої небезпеки.

У міжнародній практиці все ширше застосовуються інші методи інтегральної оцінки, що мають

на меті більш адекватно відображати вплив забруднення на довкілля та здоров'я населення.

Оцінка ризику для здоров'я. Цей підхід ґрунтується на розрахунку індивідуальних та сумарних індексів ризику з урахуванням токсичності кожного забруднювача, а також характеру його впливу (мутагенного, канцерогенного, репродуктивного тощо). Як показали дослідження Rybalova et al. (2022), ризик-орієнтовані оцінки дозволяють більш точно ідентифікувати критичні для здоров'я домішки у промислово навантажених регіонах України, таких як Маріуполь, Запоріжжя чи Кривий Ріг [6].

Просторове моделювання. ГІС-аналітика та інтерполяційні методи дозволяють будувати карти забруднення з високою роздільністю, виявляючи локальні зони перевищення та встановлюючи кореляцію з джерелами викидів. Так, у дослідженні Maksymenko et al. (2024) запропоновано методику просторового аналізу розподілу вмісту основних забруднювачів у Харкові, яка дозволяє точніше визначати пріоритетні зони для втручання [7].

Метеорологічна нормалізація. Погодні умови істотно впливають на рівні концентрацій забруднювачів (температура, вітер, вологість, атмосферна стійкість тощо). Нормалізація даних за допомогою методів машинного навчання дає змогу виділити довгострокові тренди забруднення, незалежно від короткострокових коливань погоди. Дослідження Qiu et al. (2022) демонструє ефективність таких підходів для трендового аналізу $PM_{2.5}$ і озону в умовах мінливого клімату [5].

Результати аналізу свідчать про доцільність перегляду методології КІЗА в таких аспектах:

1. стандартизація складу індексу (уніфікований набір забруднювачів);
2. запровадження чітко визначених порогових категорій оцінки;
3. інтеграція індексу з оцінкою ризиків для здоров'я населення;
4. врахування просторових та часових характеристик забруднення;
5. застосування сучасних методів нормалізації, що враховують метеорологічні фактори.

Врахування цих аспектів дозволить підвищити наукову достовірність, об'єктивність та управлінську цінність оцінок якості атмосферного повітря в Україні.

Головні висновки. Проведене дослідження дозволило виявити низку концептуальних і прикладних обмежень у застосуванні Комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА) як основного індикатора оцінки якості повітря в Україні. Встановлено, що:

1. індекс не є стандартизованим – у його розрахунках у різних містах використовується різна кількість забруднювальних речовин, що унеможливує міжрегіональне порівняння;
2. методика не враховує комбінованої дії речовин, їхньої токсичності та синергетичних ефектів;

3. відсутні формалізовані порогові значення для інтерпретації індексу, що ускладнює практичне використання даних моніторингу;

4. індекс ігнорує короткострокові пікові перевищення та вплив метеорологічних умов.

Водночас сучасна міжнародна практика екологічного моніторингу вказує на доцільність переходу до більш комплексних підходів, що поєднують просторовий аналіз, нормалізацію за погодними факторами та оцінку ризиків для здоров'я населення. Зокрема, застосування інтегрованих ризик-орієнтованих моделей дозволяє точніше визначати пріоритетні забруднювачі, зони небезпеки та напрями регіональної політики охорони атмосферного повітря.

У цьому контексті доцільно рекомендувати:

1. Оновлення методики КІЗА із запровадженням єдиного набору речовин для розрахунку;

2. Встановлення порогових категорій індексу (низький, помірний, високий ризик тощо);

3. Інтеграцію оцінки КІЗА з показниками здоров'я-ризиків та токсичності речовин;

4. Використання геоінформаційного просторового моделювання забруднення;

5. Застосування методів метеорологічної нормалізації для виявлення трендів.

Удосконалення підходів до оцінки якості повітря дозволить підвищити ефективність управління екологічною безпекою, зробити моніторинг більш прозорим і науково обґрунтованим, а також сприятиме поліпшенню якості життя населення.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення методичних підходів у державній системі моніторингу атмосферного повітря, зокрема при перегляді формули КІЗА, уніфікації набору забруднювальних речовин та впровадженні порогових категорій оцінки. Запропоновані альтернативи – ризик-орієнтовані моделі, просторове моделювання та метеорологічна нормалізація – можуть стати основою для розробки інтегрованих індикаторів, що краще відображають екологічну та гігієнічну ситуацію в містах. Застосування цих підходів сприятиме підвищенню точності екологічного аналізу, обґрунтованості управлінських рішень і ефективності заходів із охорони здоров'я населення та довкілля.

Література

1. Методика розрахунку комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА). Вид. офіц. Київ : Центр. геофіз. обсерваторія ім. Б. Срезнев., 2020. 25 с.
2. Ambient (outdoor) air pollution. *World Health Organization (WHO)*. 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) (date of access: 25.05.2025).
3. Europe's air quality status 2023. *European Environment Agency*. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023> (date of access: 25.05.2025).
4. Health impacts and social costs associated with air pollution in larger urban areas of Ukraine. *United Nations Development Programme*. URL: <https://www.undp.org/ukraine/publications/health-impacts-and-social-costs-associated-air-pollution-larger-urban-areas-ukraine> (date of access: 23.05.2025).
5. Qiu M., Zigler C., Selin N. E. Statistical and machine learning methods for evaluating trends in air quality under changing meteorological conditions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 22, no. 16. P. 10551–10566. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-22-10551-2022> (date of access: 25.05.2025).
6. Risk assessment for public health from air pollution in the industrial regions of Ukraine / O. Rybalova et al. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Geology. Geography. Ecology*. 2022. No. 56. P. 240–254. URL: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-18> (date of access: 25.05.2025).
7. Spatial modeling of air pollution in Kharkiv city / N. Maksymenko et al. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2024. Vol. 1, no. 33. P. 108–117. URL: <https://doi.org/10.15421/112412> (date of access: 30.11.2024).

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: