

© О.О. Борисовська¹, А.Г. Рудченко¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОЦІНКА РИЗИКУ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В ІНДУСТРІАЛЬНОМУ МІСТІ

О. Borysovska¹, <https://orcid.org/0000-0001-7309-0236>

А. Rudchenko¹, <https://orcid.org/0009-0000-1850-3712>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

HEALTH RISK ASSESSMENT AS A TOOL FOR AMBIENT AIR QUALITY MANAGEMENT IN AN INDUSTRIAL CITY

Мета. Метою роботи є порівняльна характеристика двох методик оцінки ризику для здоров'я населення від забруднення повітря, а також оцінка ризику для мешканців м. Дніпро від забруднення повітря.

Методика. Оцінку ризику для здоров'я виконано із застосуванням епідеміологічного та хіміко-токсикологічного підходів відповідно до чинних методик МОЗ України. Популяційний ризик від впливу $PM_{2.5}$ та NO_2 визначено за моделлю «концентрація-ефект», а канцерогенний і неканцерогенний ризики – шляхом розрахунку коефіцієнтів небезпеки та індивідуального і популяційного канцерогенного ризику.

Результати. Встановлено, що концентрації $PM_{2.5}$ та NO_2 у більшості досліджених районів м. Дніпро перевищують безпечні рівні та зумовлюють зростання смертності на 28–54 % і 19–41 % відповідно, формуючи до 22–35 % випадків передчасної смертності від $PM_{2.5}$ та 16–29 % – від NO_2 . За результатами розрахунків щороку в місті очікуються десятки передчасних смертей, пов'язаних із цими забруднювачами. Канцерогенний ризик від формальдегіду оцінено як низький водночас неканцерогенний ризик для органів дихання є високим у всіх зонах спостережень.

Наукова новизна. Уперше проведено комплексну оцінку ризику для здоров'я населення м. Дніпро, що включає одночасне визначення відносного ризику, канцерогенного та неканцерогенного ризиків із використанням двох офіційних методик, що дозволило отримати багатовимірну характеристику впливу повітря на здоров'я. Встановлено реальні рівні передчасної смертності, пов'язаної з $PM_{2.5}$ і NO_2 , з урахуванням просторової диференціації забруднення у місті. Вперше для м. Дніпро виконано просторову оцінку ризику, що дало змогу виділити найпроблемніші зони та встановити пріоритетні ділянки для екологічних втручань.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють визначити найбільш небезпечні для здоров'я населення території міста та спрямувати ресурси на контроль викидів саме в тих районах, де ризик є найвищим. Кількісна оцінка наслідків для здоров'я може використовуватися для економічного обґрунтування природоохоронних заходів, визначення пріоритетів фінансування та підготовки екологічних проєктів.

Ключові слова: оцінка ризику, атмосферне повітря, популяційний ризик, канцерогенний ризик, неканцерогенний ризик, управління якістю повітря.

Вступ. Необхідною умовою для розроблення ефективної екологічної політики в умовах зростання промислового навантаження та урбанізації є науково

обґрунтована оцінка впливу забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення. В Україні ця оцінка реалізована у двох нормативних документах: Методика оцінки ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря твердими частинками, діоксидом азоту та озonom [1] та Методика оцінки канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря [2].

Перша методика ґрунтується на підході, рекомендованому Всесвітньою організацією охорони здоров'я [3–5], і спрямована на кількісне визначення впливу основних атмосферних забруднювачів – $PM_{2.5}$, NO_2 та O_3 – на рівень смертності та захворюваності населення. Ключовими показниками є відносний ризик (ВР) та популяційна атрибутивна фракція (ПАФ), що дозволяють розрахувати кількість випадків захворювань і смертей, яких можна було б уникнути за умов зниження забруднення до безпечного рівня. Ця методика орієнтована на оцінку популяційного ризику та використовується як інструмент планування заходів із поліпшення якості повітря та зменшення негативного впливу на здоров'я людей.

Друга методика спрямована на визначення ймовірності розвитку онкологічних і неонкологічних захворювань унаслідок дії хімічних речовин, що потрапляють у повітря внаслідок промислових процесів, транспорту та інших джерел. Основними розрахунковими показниками є коефіцієнт небезпеки (НҚ) та індекс небезпеки (НІ) для неканцерогенних ефектів, а також індивідуальний і популяційний канцерогенний ризик (CR, PCR), визначені за допомогою факторів канцерогенного потенціалу (SF) або одиничного ризику (UR). Результати методики використовують для визначення пріоритетних забруднювачів, розроблення заходів профілактики онкологічних хвороб і управління ризиками для здоров'я населення на місцевому та державному рівнях.

Незважаючи на існування цих методик, питання комплексної оцінки як популяційного, так і індивідуального ризику для конкретних українських міст, зокрема м. Дніпро, залишається недостатньо дослідженим. Більшість попередніх робіт обмежується оцінкою окремих забруднювачів або використанням лише однієї методики, що не дозволяє повністю врахувати різні аспекти впливу атмосферного забруднення на здоров'я населення.

Актуальність роботи полягає у необхідності інтегрованого підходу до оцінки ризику для здоров'я населення від комплексного забруднення атмосферного повітря, що включає як тверді частинки та діоксид азоту, так і хімічні речовини, які можуть викликати канцерогенні та неканцерогенні ефекти. Отримані результати дозволять визначити пріоритетні забруднювачі у м. Дніпро та обґрунтувати конкретні рекомендації щодо зниження ризику для здоров'я населення та покращення якості атмосферного повітря.

Метою роботи є порівняльна характеристика двох методик оцінки ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря, а також оцінка ризику для мешканців м. Дніпро від твердих частинок та діоксиду азоту, а також канцерогенного ризику та неканцерогенного ризику, пов'язаного із забрудненням повітря.

Основна частина. У двох вищезгаданих підходів до оцінки ризику для здоров'я є певні спільні риси:

1) єдина мета – визначити, як забруднення атмосферного повітря впливає на здоров'я населення, оцінити ступінь ризику та ймовірність виникнення негативних наслідків (захворюваність, смертність, канцерогенні ефекти тощо);

2) обидві методики проводять оцінку для груп населення, а не для окремих осіб (розрахунок ведеться за середньостатистичними показниками захворюваності, смертності, густоти населення);

3) обидві методики використовують єдину 4-х етапну структуру аналізу ризику: ідентифікація небезпеки, оцінка експозиції, характеристика небезпеки (зв'язок «концентрація–ефект» або «доза–відповідь»), характеристика ризику;

4) в обох випадках застосовуються наукові функції зв'язку впливу із наслідками для здоров'я, отримані з епідеміологічних або токсикологічних досліджень;

5) обидві системи кількісно виражають імовірність або частку населення, що може зазнати шкідливого впливу;

6) обидві методики орієнтовані на профілактику та управління ризиком, вони дозволяють не лише оцінити ризик, а й надати основу для рішень, спрямованих на зменшення впливу забруднення та покращення стану довкілля;

7) для обох підходів необхідні дані про концентрації забруднювачів у повітрі, просторовий розподіл населення, вікову структуру та базові показники смертності/захворюваності

Хоча ці методики різняться типом ризику (перша – оцінює вплив основних забруднювачів на смертність і захворюваність, друга – хімічні канцерогенні та неканцерогенні ризики), обидві мають єдину логіку, структуру та цільову спрямованість – науково обґрунтовану оцінку впливу атмосферного повітря на здоров'я населення.

У таблиці 1 наведено більш детальне порівняння двох методик оцінки ризику для здоров'я населення.

Паралельне існування цих двох методик пояснюється тим, що вони охоплюють різні аспекти впливу забруднення атмосферного повітря на здоров'я. Перша методика (2022 р.) спрямована на оцінку загального популяційного ризику, тобто визначення, як основні атмосферні забруднювачі – тверді частинки, діоксид азоту, озон – впливають на рівень смертності та захворюваності у великих групах населення. Вона має епідеміологічну спрямованість і дає змогу оцінити масштаб проблеми на рівні міста, регіону чи країни. Друга методика (2023 р.) деталізує хімічний склад ризику – дозволяє визначити, які саме хімічні речовини (зокрема канцерогени) становлять найбільшу небезпеку, розрахувати їхній внесок у розвиток онкологічних і неонкологічних ефектів, а також оцінити сумарний ризик при одночасному впливі кількох сполук. Отже, перша методика оцінює вплив типових сумішей забруднювачів на загальний стан здоров'я населення, а друга – конкретизує токсикологічні механізми дії окремих хімічних речовин.

Разом вони створюють повну систему оцінки ризику, що поєднує медико-епідеміологічний та хіміко-токсикологічний підходи, забезпечуючи більш точне

і комплексне розуміння екологічних загроз для здоров'я людей в Україні. Отже, інтегроване застосування цих двох методик є необхідною умовою для сучасної екологічної практики, оскільки воно забезпечує всебічний аналіз стану атмосферного повітря та дозволяє більш точно прогнозувати наслідки його забруднення для здоров'я населення.

Таблиця 1

Порівняння двох методик оцінки ризику для здоров'я населення

Критерій	Методика оцінки ризику від $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 (2022)	Методика оцінки канцерогенного та неканцерогенного ризику (2023)
Нормативна база	Наказ МОЗ №89 від 17.01.2022	Наказ МОЗ №1811 від 18.11.2023
Основна мета	Оцінка популяційного ризику передчасної смертності та захворюваності від основних атмосферних забруднювачів	Оцінка канцерогенних і неканцерогенних ризиків для здоров'я від хімічних речовин у повітрі
Тип забруднювачів	$PM_{2.5}$, NO_2 , O_3	Широкий список хімічних речовин (канцерогени й токсиканти)
Наукова основа	Епідеміологічні дослідження, зв'язок «концентрація-ефект»	Токсикологічні та епідеміологічні дані, залежність «доза-відповідь»
Ключові показники	ВР, ПАФ, передчасна смертність	HQ, HI, CR, PCR, SF, UR
Цільова аудиторія	Центри громадського здоров'я, екологічні служби	Ті самі установи + фахівці промислової та лабораторної токсикології
Шкала оцінки ризику	Популяційний ризик (масштаб явища)	Індивідуальний і популяційний канцерогенний та неканцерогенний ризик
Тип результату	Орієнтація на оцінку впливу сумішей типових забруднювачів	Визначення небезпечних хімічних речовин та їх внеску у загальний ризик
Призначення	Планування політики щодо зменшення смертності та захворюваності від класичних забруднювачів	Управління ризиками від конкретних токсичних речовин, включно з канцерогенами
Особливість підходу	Оцінює вплив сумішей забруднювачів на великі групи населення	Диференціює ризики за окремими хімічними агентами та критичними органами

З урахуванням цього, у даній роботі була виконана оцінка ризику для мешканців м. Дніпро:

- від твердих частинок та діоксиду азоту (за першою методикою);
- канцерогенного ризику, пов'язаного із забрудненням формальдегідом (за другою методикою);
- неканцерогенного ризику, пов'язаного із забрудненням пилом, сірчистим ангідридом, оксидом вуглецю, діоксидом азоту, оксидом азоту, фенолом, аміаком і сірководнем (за другою методикою).

Оцінка ризику для здоров'я населення м. Дніпро від забруднення атмосферного повітря твердими частинками та діоксидом азоту. Для розрахунку рівня впливу на населення різних рівнів забруднення атмосферного повітря за методикою [1] потрібна інформація про просторовий розподіл концентрацій забруднювачів повітря (середньорічні показники) та інформація про населення.

Для розрахунку скористалися щодайними даними Департаменту екології та природних ресурсів Дніпропетровської обласної державної адміністрації [6]. Базова мережа спостережень за станом атмосферного повітря у житлових зонах м. Дніпро наразі складається з 6 неавтоматизованих стаціонарних постів спостережень (ПЗС) за станом атмосферного повітря, що належать Дніпропетровському регіональному центру з гідрометеорології:

1. ПЗС № 10 – парк ім. Т.Г. Шевченка (48.460287, 35.070977);
2. ПЗС № 13 – вул. Філософська, 94 (48.457022, 35.012249);
3. ПЗС № 19 – вул. Краснопільська, 11 (48.409078, 34.997768);
4. ПЗС № 20 – пр. Івана Мазепи, 38 (48.466242, 34.974428);
5. ПЗС № 24 – вул. Богдана Хмельницького (48.503791, 35.084190);
6. ПЗС № 25 – проспект Героїв, 21 (48.411513, 35.067832).

Середньорічні концентрації забруднюючих речовин по 6 постах спостережень отримали шляхом усереднення щодайних даних за 12 місяців (листопад 2024 – жовтень 2025). Наразі стаціонарні пости спостережень за станом атмосферного повітря не вимірюють концентрацію озону та часток пилу розміром 2,5 мкм. Тому обчислити ризик від забруднення повітря озоном наразі неможливо, а для перерахунку загальної концентрації «звичайного пилу» (завислих речовин, TSP – total suspended particles) у фракцію PM_{2.5} скористалися типовими коефіцієнтами співвідношень між фракціями пилу, які застосовуються у містах із подібним типом забруднення. Для промислових українських міст (Дніпро, Кривий Ріг, Запоріжжя, Маріуполь до 2022 р.) орієнтовні співвідношення такі: PM₁₀ – частка у загальній концентрації TSP – 30-50 %; PM_{2.5} – частка у TSP 15-25 % від TSP або 40-60 % від PM₁₀. Це підтверджено низкою досліджень індустріальних міст Східної Європи [7].

З урахуванням даних коефіцієнтів, у табл. 2 наведений розрахунок середньорічних концентрацій зазначених шкідливих речовин у атмосферному повітрі м. Дніпро.

У роботі [7] на основі даних про не випадкові смерті в Україні було встановлено, що близько 22 000–27 000 людей у найбільш забруднених містах України щорічно помирають від причин, пов'язаних із забрудненням повітря. Це стано-

вить близько 10 % від загальної смертності в цих містах. Використовуючи дані [7] щодо річної смертності у м. Дніпро – 15,485 на 1000 осіб, отримали загальний коефіцієнт смертності від причин, пов'язаних із забрудненням повітря для м. Дніпро – 1,5485 на 1000 осіб у віковій групі 30+ років.

Таблиця 2

Середньорічні концентрації забруднюючих речовин
в атмосферному повітрі м. Дніпро

Речовина	ГДК сд, мг/м ³	ПСЗ №10	ПСЗ №13	ПСЗ №19	ПСЗ №20	ПСЗ №24	ПСЗ №25
Пил (TSP), мг/м ³	0,15	0,22	н.д.*	0,29	0,21	0,35	н.д.
PM2.5, мг/м ³	-	0,045	н.д.	0,055	0,04	0,07	н.д.
Діоксид азоту, мг/м ³	0,04	0,052	0,065	0,076	0,070	0,082	0,064

* - немає даних

У таблиці 3 представлені відносні ризики смертності з довірчим інтервалом (ДІ) 95 %, включаючи базову концентрацію, яка враховується для розрахунку впливу кожного забруднювача повітря на здоров'я.

Таблиця 3

Коефіцієнти ризику, що пов'язують вплив PM_{2.5} та NO₂ зі смертністю, їх 95 % довірчий інтервал та базові рівні концентрації [3]

Забруднювач	КР (95 % ДІ) на 10 мкг/м ³	Наслідок для здоров'я
PM _{2.5}	1,062 (1,040 – 1,083) C ₀ = 0 мкг/м ³	Смертність від усіх (природних) причин у всіх вікових категоріях (МКХ-10, коди A00–R99)
NO ₂	1,055 (1,031 – 1,08) C ₀ = 20 мкг/м ³	Смертність від усіх (природних) причин у всіх вікових категоріях (МКХ-10, коди A00–R99)

Далі послідовно були виконані усі 9 кроків, рекомендовані методикою [1].

Враховуючи просторове розташування пунктів спостереження за станом атмосферного повітря, на карту м. Дніпро нанесли сітку з розміром клітин 4x4 км із таким розрахунком, щоб кожен ПЗС потрапив у окрему клітинку. Місце розташування ПЗС № 13 обумовило його приналежність до двох комірок сітки, отже таким чином отримали 7 комірок, для яких маємо достовірні офіційні дані щодо концентрації небезпечних речовин у повітрі (рис. 1).

Для обчислення відносного ризику скористалися формулою (1):

$$BPC = \exp [\beta (C - C_0)], \quad (1)$$

де C – фактична концентрація, якій піддається населення; C_0 – початкова або гіпотетична концентрація, від якої відраховується вплив; β – параметр співвідношення «концентрація-ефект», отриманий із епідеміологічних досліджень.

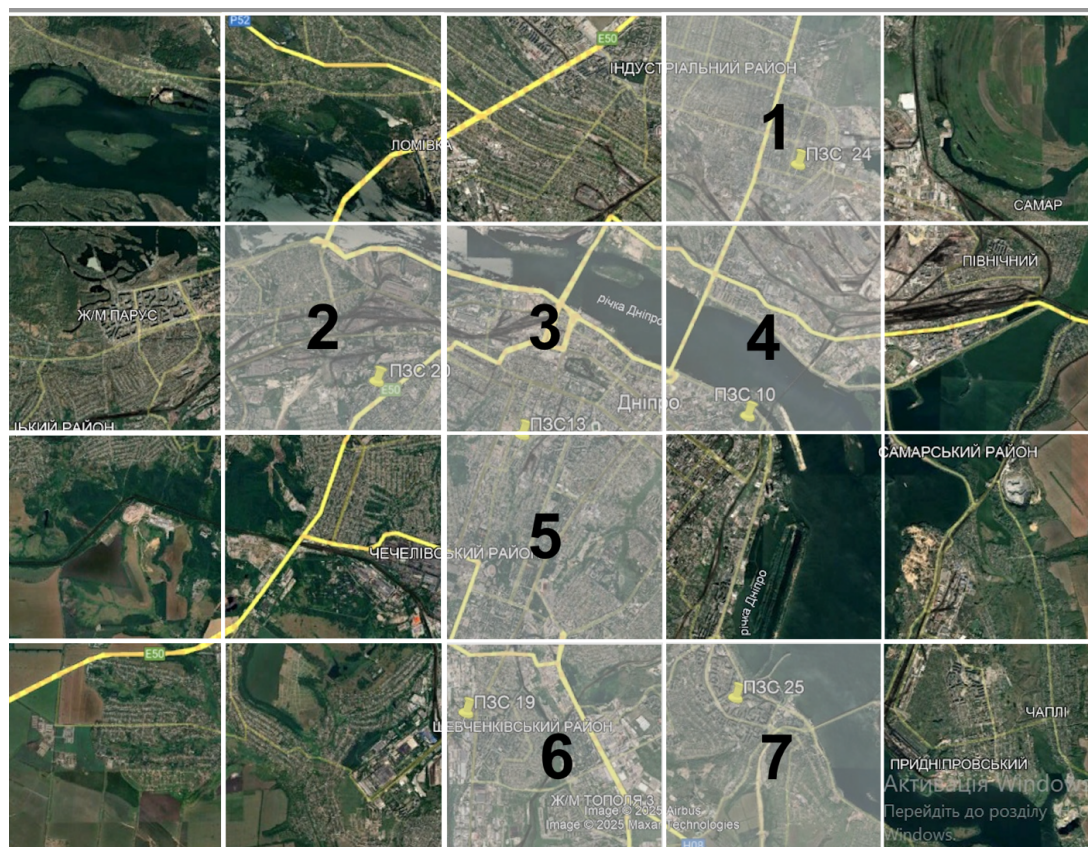


Рис. 1. Аналізовані ділянки м. Дніпро

Щоб оцінити, яку частку смертей чи захворювань можна було б запобігти, якби джерело ризику (у даному випадку $PM_{2.5}$ та NO_2) було повністю усунено, застосували показник популяційної атрибутивної фракції:

$$PAF = (BRC - 1) / BRC, \quad (2)$$

де BRC – відносний ризик для даної концентрації.

Визначення наслідків для здоров'я (передчасної смертності) здійснювали за формулою (3):

$$PC = \sum_{v,c} ZKC_{v,c} \times PAF \times N_{ac} \quad (3)$$

де ZKC (загальний коефіцієнт смертності) за статтю (с) та віком (в) – кількість смертей у відповідній групі населення за певною причиною [7–10]; PAF – популяційна атрибутивна фракція; N_{ac} – чисельність населення відповідної віково-статевої групи [1].

Таблиця 4 містить результати цих розрахунків. Отже, на основі розрахунків відносного ризику було встановлено, що при концентрації твердих частинок $45\text{--}70 \text{ мкг/м}^3$ (враховується весь діапазон концентрацій) відносний ризик становить $1,281\text{--}1,543$; тобто смертність зростає на $\sim 28,1\text{--}54,3\%$. Концентрація NO_2 , що перевищує 20 мкг/м^3 , знаходиться на рівні $32\text{--}62 \text{ мкг/м}^3$ і спричиняє відносний ризик на рівні $1,192\text{--}1,406$, тобто смертність зростає на $\sim 19,2\text{--}40,6\%$.

Розрахунок атрибутивної фракції показав, що для $PM_{2.5}$ PAF становить від $0,220$ до $0,352$, що означає, що від 22 до 35% випадків передчасної смертності у

цій зоні можна атрибутувати впливу $PM_{2.5}$ понад фоновий рівень; для NO_2 ПДФ становить від 0,161 до 0,289 і це означає, що від 16 до 29% смертей пов'язані із підвищеним вмістом NO_2 .

У зонах з концентрацією $PM_{2.5}$ від 45 до 70 $мкг/м^3$ щорічно очікується від 8 до 21 передчасних смертей, пов'язаних із впливом твердих частинок. У зонах із концентрацією NO_2 у діапазоні 52–82 $мкг/м^3$ цей показник дорівнює від 5 до 19 випадків щорічно.

Таблиця 4

Розрахунок відносного ризику для здоров'я населення м. Дніпро від забруднення атмосферного повітря твердими частинками та діоксидом азоту

Речовина	Показник	ПСЗ №10	ПСЗ №13	ПСЗ №19	ПСЗ №20	ПСЗ №24	ПСЗ №25
$PM_{2.5}$	β , на 1 $мкг/м^3$	0,0062	–	0,0062	0,0062	0,0062	–
	$C - C_0$, $мкг/м^3$	45	–	55	40	70	–
	BP_C	1,322	–	1,406	1,281	1,543	–
	ПДФ	0,243	–	0,289	0,220	0,352	–
	$ЗКС_{30+}$	0,00155	–	0,00155	0,00155	0,00155	–
	Нас, осіб	30000	–	30000	30000	30000	–
	ПС, осіб	7,7–14,5	–	9,2–17	6,9–13,1	11,3–20,5	–
NO_2	β , на 1 $мкг/м^3$	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055
	$C - C_0$, $мкг/м^3$	32	45	56	50	62	44
	BP_C	1,192	1,281	1,361	1,317	1,406	1,274
	ПДФ	0,161	0,219	0,265	0,240	0,289	0,215
	$ЗКС_{30+}$	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155
	Нас, осіб	30000	30000	30000	30000	30000	30000
	ПС, осіб	4,4–10,5	6,0–14,0	7,4–16,8	6,7–15,3	8,1–18,2	5,9–13,8

Оцінка канцерогенного ризику для населення м. Дніпро від забруднення повітря формальдегідом. Концентрація даної речовини визначається на трьох із шести пунктів спостереження Дніпропетровського регіонального центру з гідрометеорології [6]. За методикою [2], основою для оцінки ризику є визначення середньої добової дози речовини за формулою (4):

$$ADD / LADD = \frac{[(Ca \cdot Tout \cdot Vout) + (Ch \cdot Tin \cdot Vin)] \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT \cdot 365}, \quad (4)$$

де Ca – концентрація речовини в атмосферному повітрі, $мг/м^3$; Ch – концентрація речовини у повітрі приміщення, $мг/м^3$; $Tout$ – час, що проводиться поза приміщенням, год/доба; Tin – час, що проводиться у приміщенні, год/доба; $Vout$ – швидкість дихання поза приміщенням, $м^3/год$; Vin – швидкість дихання у приміщенні,

$\text{м}^3/\text{год}$; EF – частота впливу, днів/рік; ED – тривалість впливу, років; BW – маса тіла, кг; AT – період осереднення експозиції, років.

Розрахунок індивідуального канцерогенного ризику здійснювали за формулою (5):

$$CR = LADD \cdot SF, \quad (5)$$

де $LADD$ – середня добова доза протягом життя, $\text{мг}/(\text{кг} \cdot \text{доба})$; SF – фактор нахилу, $[\text{мг}/(\text{кг} \cdot \text{доба})]^{-1}$.

Популяційний ризик визначали за формулою (6):

$$PCR = CR \cdot POP, \quad (6)$$

де CR – індивідуальний канцерогенний ризик; POP – чисельність популяції, що підпадає під вплив даного фактора, чол. [2].

У таблиці 5 наведені результати розрахунків.

Таблиця 5

Розрахунок індивідуального та популяційного ризику впливу формальдегіду

Показник	Од. вим.	ПСЗ №10	ПСЗ №19	ПСЗ №20
Ca	$\text{мг}/\text{м}^3$	0,011	0,013	0,01
$LADD$	$\text{мг}/(\text{кг} \cdot \text{доба})$	0,00045	0,00053	0,00041
SF	$[\text{мг}/(\text{кг} \cdot \text{доба})]^{-1}$	0,046	0,046	0,046
CR	—	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
POP	осіб	30 000	30 000	30 000
PCR	—	0,62	0,74	0,57

Згідно із системою критеріїв, рекомендованою у [2] на основі публікацій ВООЗ, отримане значення канцерогенного ризику протягом життя відноситься до низького, тобто припустимого ризику (рівень, на якому, як правило, встановлюються гігієнічні нормативи для населення).

Популяційний ризик PCR відображає додаткову (до фонові) кількість випадків новоутворень, які можуть виникнути протягом життя внаслідок впливу досліджуваного фактора. Серед 30 тис. мешканців Дніпра (середня щільність населення у кожній досліджуваній комірці карти) очікується $\approx 0,6$ – $0,7$ додаткових випадків раку за життя через вплив формальдегіду. Ця величина популяційного канцерогенного ризику за класифікацією рівнів ризику ВООЗ теж буде низькою.

Оцінка неканцерогенного ризику для мешканців міста Дніпро, пов'язаного із забрудненням атмосферного повітря неканцерогенними речовинами. Міжнародна методологія оцінки ризику передбачає, що для неканцерогенних речовин та канцерогенів негенотоксичної дії передбачається наявність порогових рівнів, нижче від яких шкідливі ефекти не виникають. Рівні мінімального ризику – це референтні концентрації (RfC).

Оцінка ризику неканцерогенних ефектів проводиться шляхом порівняння фактичних рівнів впливу з безпечними (референтними) концентраціями і визначення коефіцієнта небезпеки за формулою (7):

$$HQ = AC / RfC, \quad (7)$$

де HQ – коефіцієнт небезпеки; AC – середня концентрація речовини в повітрі, мг/м^3 ; RfC – референтна концентрація, мг/м^3 [2].

Якщо для речовини відсутні референтні концентрації, згідно даної методики можна використовувати гранично допустимі концентрації або максимально недіючі рівні, встановлені на основі критерію прямого впливу на здоров'я. Характеристика ризику розвитку неканцерогенних ефектів при одночасному впливі кількох хімічних речовин здійснюється шляхом розрахунку індексу небезпеки (HI) як суми коефіцієнтів небезпеки HQ для окремих компонентів.

Результати розрахунків наведені у табл. 6 і вони показали наступне. Пил, діоксид азоту та сірководень формують найвищий хронічний неканцерогенний ризик у місті. Значення HQ у 2–4 рази перевищують допустимі пороги, що потребує негайної уваги природоохоронних та санітарних служб. Індекс небезпеки HI для органів дихання свідчить про стабільно високий рівень неканцерогенного ризику для дихальної системи населення на всіх пунктах спостереження. Найбільш несприятливе становище спостерігається на ПСЗ №19, №20 та №24, де ризик є найвищим.

Таблиця 6

Розрахунок коефіцієнту небезпеки (HQ) та індексу небезпеки (HI)

Речовина	Критичні органи	HQ					
		ПСЗ №10	ПСЗ №13	ПСЗ №19	ПСЗ №20	ПСЗ №24	ПСЗ №25
Пил	Органи дихання	2,20	–	2,90	2,10	3,50	–
Сірч.ангідрид		0,13	–	0,11	0,16	0,13	–
Діоксид азоту		1,30	1,63	1,90	1,75	2,05	1,60
Оксид азоту		–	0,55	–	–	–	–
Аміак		0,26	–	–	0,37	–	–
Сірководень		2,00	2,00	2,00	4,00	3,00	2,00
Індекс HI		5,89	4,18	6,91	8,38	8,68	3,60
Рівень ризику		високий	високий	високий	високий	високий	високий
Оксид вуглецю	ЦНС, серц.-суд. система	0,64	–	0,81	0,95	0,72	–
Фенол		0,33	–	–	0,33	0,50	–
Індекс HI		0,97	–	0,81	1,29	1,22	–
Рівень ризику		допустимий	–	допустимий	насторожуючий	насторожуючий	–

Індекс небезпеки для інших систем організму (ЦНС, серцево-судинна система, кров та ін.) значно нижчий, ніж для органів дихання, і на кількох ПСЗ не перевищує одиниці, що класифікується як «допустимий» рівень ризику. Проте, на ПСЗ №20 (1,29) та №24 (1,22) спостерігається перевищення допустимого рівня, що вказує на потенційну загрозу для центральної нервової та серцево-судинної систем у цих районах.

Висновки. Оцінка ризику для здоров'я населення м. Дніпро показала, що концентрації $PM_{2.5}$ та NO_2 у більшості досліджених зон стабільно перевищують орієнтовні безпечні рівні та формують суттєві негативні наслідки для здоров'я. Розраховані показники свідчать про зростання смертності на 28–54 % під впливом $PM_{2.5}$ та на 19–41 % – через NO_2 . Встановлено, що 22–35 % випадків передчасної смертності можна пов'язати з твердими частинками, а 16–29 % – з діоксидом азоту. За підсумковими розрахунками, у семи аналізованих комірках мапи міста щороку очікується близько 35–36 передчасних смертей, пов'язаних з $PM_{2.5}$, та 39–89 смертей – з NO_2 .

Оцінка канцерогенного ризику, пов'язаного з впливом формальдегіду в атмосферному повітрі м. Дніпро показала, що попри наявність формальдегіду в атмосферному повітрі міста та локальні перевищення середньорічних концентрацій, канцерогенний ризик для населення Дніпра залишається низьким у межах прийнятних нормативних критеріїв. Водночас результати підкреслюють доцільність подальшого моніторингу та оновлення даних спостережень, оскільки рівень формальдегіду у міських умовах може змінюватись під впливом промислових та транспортних факторів.

Оцінка неканцерогенного ризику показала високий ризик для органів дихання – індекс небезпеки стабільно перевищує допустимий рівень на всіх пунктах спостереження, досягаючи критичних значень (від 3,60 до 8,68). Це свідчить про системну загрозу респіраторному здоров'ю населення. Найвищі рівні ризику виявлені в районах, що відповідають ПСЗ №19, 20 та 24. Загроза для центральної нервової та серцево-судинної систем є значно нижчою. Однак на ПСЗ №20 та 24 зафіксовано перевищення допустимого рівня, що вказує на потенційну небезпеку і потребує контролю.

Отже, стан атмосферного повітря м. Дніпро слід визнати незадовільним. Для захисту здоров'я населення необхідні невідкладні заходи з виявлення та контролю джерел викидів (промисловість, транспорт), особливо щодо пилу, сірководню та діоксиду азоту, із пріоритетом для найкритичніших районів міста.

Перелік посилань

1. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря. № 89. (2022).
2. Про затвердження методичних рекомендацій Оцінка канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря». №1811. (2023).
3. *Health risks of air pollution in Europe: HRAPIE project: new emerging risks to health from air pollution: results from the survey of experts* (n.d.). <https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2013-6696-46462-67326>
4. *WHO – Air quality, energy and health*. (n.d.). <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health>
5. *European Environment Agency (EEA)/ Air pollution*. (n.d.). <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution?activeTab=07e50b68-8bf2-4641-ba6b-edaf544be%20>

6. Інформаційно-аналітичний огляд стану атмосферного повітря (щодокади) Департаменту екології та природних ресурсів Дніпропетровської обласної державної адміністрації (n.d.). <https://adm.dp.gov.ua/file-storage/atmosferne-povitrya>
7. Strukova, E., Golub, A., & Markandya, A. (2011). Air pollution costs in Ukraine. *Environmental Economics*, 2(3), 52–63.
8. *The Global Health Observatory (GHO)*. (n.d.). <https://www.who.int/data/gho/data/indicators>
9. Статистичний збірник «Таблиці народжуваності, смертності та середньої очікуваної тривалості життя». (n.d.). https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publnasel_u.html
10. Медична статистична звітність на порталі відкритих даних (n.d.). https://data.gov.ua/dataset/medychna_zvitnist_moz

ABSTRACT

Purpose. The purpose of this study is to provide a comparative description of two methods for assessing the risk to public health from air pollution, as well as to assess the risk to residents of Dnipro from air pollution.

Methodology. The health risk assessment was performed using epidemiological and chemical and toxicological approaches in accordance with the current methods by the Ministry of Health of Ukraine. The population risk from exposure to PM_{2.5} and NO₂ was determined using the ‘concentration-effect’ model, and the carcinogenic and non-carcinogenic risks were determined by calculating the hazard quotients and individual and population carcinogenic risk.

Results. It was found that PM_{2.5} and NO₂ concentrations in most of the studied areas of Dnipro exceed safe levels and cause an increase in mortality by 28-54% and 19-41%, respectively, accounting for up to 22-35% of premature deaths from PM_{2.5} and 16-29% from NO₂. According to the calculations, dozens of premature deaths related to these pollutants are expected in the city each year. The carcinogenic risk from formaldehyde is assessed as low, while the non-carcinogenic risk to the respiratory system is high in all observation areas.

Scientific novelty. For the first time, a comprehensive assessment of health risks for the population of Dnipro was carried out, including the simultaneous determination of relative risk, carcinogenic risk, and non-carcinogenic risk using two official methodologies. This approach made it possible to obtain a multidimensional characterisation of the impact of air pollution on public health. Actual levels of premature mortality associated with PM_{2.5} and NO₂ were established, taking into account the spatial differentiation of pollution within the city. For the first time for Dnipro, a spatial health risk assessment was conducted, enabling the identification of the most problematic areas and the prioritisation of environmental interventions.

Practical significance. The results obtained make it possible to identify the areas of the city that are most dangerous to public health and to direct resources to control emissions in those areas where the risk is highest. Quantitative assessment of health effects can be used to justify environmental protection measures, determine funding priorities, and prepare environmental projects.

Keywords: risk assessment, atmospheric air, air pollution, population risk, carcinogenic risk, non-carcinogenic risk, air quality management.

дата першого надходження статті до видання	14.04.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	17.05.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.06.2026