ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРИ

УДК 614.71:504.05:613.9(477.83)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.16

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ДЛЯ ТРИВАЛОСТІ ЖИТТЯ НАСЕЛЕННЯ М. ТЕРНОПІЛЬ НА ОСНОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ «ДОЗА-ЕФЕКТ» В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ

Колісник А.В. (orcid.org/0000-0002-0622-9637),
Грабко Н.В. (orcid.org/0000-0003-1412-5683),
Храпун М.А. (orcid.org/0009-0009-7013-0963)
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
вул. Змієнка Всеволода, 2, 65082, м. Одеса
kolisnyk.a.v@gmail.com, grabkonatalyavikt@gmail.com

Оцінка ризиків скорочення тривалості життя мешканців міст унаслідок забруднення атмосферного повітря є надзвичайно актуальною для обґрунтування природоохоронних заходів та своєчасного прийняття управлінських рішень, спрямованих на нівелювання та мінімізацію негативного техногенного впливу на населення. У науковій статті висвітлено результати комплексного дослідження екологічного ризику скорочення тривалості життя (R_{STZh}) населення м. Тернопіль внаслідок інгаляційного впливу забрудненого атмосферного повітря протягом 2016-2023 років. Дослідження проведено для трьох вікових категорій населення і виконано на основі застосування математичної моделі залежності «доза-ефект» та методології оцінки ризику для здоров'я населення. Вихідними даними слугували матеріали систематичних спостережень за станом атмосферного повітря на двох стаціонарних постах м. Тернопіль. Виділено 8 пріоритетних забруднюючих речовин (діоксид азоту NO_2, свинець Pb, манган Mn, шестивалентний хром Cr^{6+}, залізо Fe, кадмій Cd, мідь Cu, нікель Ni), вміст яких у досліджуваний період перевищував середньодобові гранично допустимі концентрації (ГДКс.д.). Встановлено, що найбільша кратність перевищення гігієнічних нормативів спостерігалася за свинцем (у 133 рази у 2021 р.) та кадмієм (у 67 разів у 2019 р.). Розраховано показники ймовірності перебування мешканців в умовах забрудненого повітря (Q_{fact}) для трьох вікових категорій (14, 22 та 60 років) при 8- та 24-годинній експозиції (діапазон значень 0,13-0,86). Отримано кількісні оцінки скорочення тривалості життя та індивідуального екологічного ризику (R_{STZh}). Доведено, що цілодобове перебування на відкритому повітрі в умовах забруднення важкими металами становить неприйнятний ризик ($R_{STZh} > 1 \cdot 10^{-6}$) для всіх вікових груп населення м. Тернопіль. Обґрунтовано пріоритетні напрями природоохоронних та містобудівних заходів для зниження техногенного навантаження на повітряний басейн міста. *Ключові слова:* екологічний ризик, атмосферне повітря, тривалість життя, залежність «доза-ефект», м. Тернопіль, важкі метали, експозиція.

A study of the environmental risk to life expectancy among the population of Ternopil based on the 'dose-effect' relationship in the context of atmospheric pollution. Kolisnyk A., Hrabko N., Khrapun M.

Assessing the risks of reduced life expectancy among urban residents due to atmospheric air pollution is of paramount importance for justifying environmental protection measures and ensuring the timely adoption of management decisions aimed at mitigating and minimizing the negative anthropogenic impact on the population.

This research article presents the results of a comprehensive study on the environmental risk of reduced life expectancy (R_{STZh}) among the population of Ternopil resulting from inhalation exposure to polluted ambient air between 2016 and 2023. The study employed a dose-effect mathematical model and a public health risk assessment methodology. The analysis was based on data from systematic ambient air quality monitoring conducted at two stationary stations in Ternopil. Eight priority pollutants were identified (nitrogen dioxide NO_2, lead Pb, manganese Mn, hexavalent chromium Cr^{6+}, iron Fe, cadmium Cd, copper Cu, and nickel Ni) whose levels during the study period exceeded the maximum permissible concentrations for a 24-hour average ($MPC_{24}h$). It was determined that the highest multiples of exceedance of hygienic standards were observed for lead (133-fold in 2021) and cadmium (67-fold in 2019). Indicators of the probability of residents being exposed to polluted air (Q_{fact}) were calculated for three age categories (14, 22, and 60 years) under 8-hour and 24-hour exposure scenarios (value range: 0,13-0,86). Quantitative estimates of the reduced life expectancy and individual environmental risk were obtained (R_{STZh}). It was demonstrated that spending 24 hours a day outdoors in conditions of heavy metal pollution poses an unacceptable risk ($R_{STZh} > 1 \cdot 10^{-6}$) for all age groups of the population of Ternopil. Priority areas for environmental protection and urban planning measures aimed at reducing the technogenic load on the city's air basin were substantiated. *Key words:* environmental risk, ambient air, life expectancy, dose–response relationship, Ternopil, heavy metals, exposure.

© Колісник А.В., Грабко Н.В., Храпун М.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Забруднення атмосферного повітря в урбанізованих територіях залишається однією з найгостріших екологічних та медико-соціальних проблем сучасності. Атмосферне повітря є життєво важливим компонентом навколишнього природного середовища, постійне надходження токсичних речовин до якого призводить до виникнення прямих та опосередкованих загроз для здоров'я і життя людини [1, 2]. На відміну від інших факторів навколишнього середовища (наприклад, питної води чи продуктів харчування), атмосферне повітря діє на організм людини безперервно протягом усього її життя, а надходження хімічних речовин інгаляційним шляхом відзначається високою біодоступністю та швидким проникненням у кров'яне русло [3, 4, 5]. В умовах інтенсивної урбанізації, зростання автотранспортних потоків та функціонування промислових підприємств у межах житлової забудови міст формується комплексне хімічне навантаження, яке викликає передчасну захворюваність, хронізацію соматичних патологій та скорочення тривалості життя населення [2, 6, 7].

Медико-екологічна статистика свідчить, що тривалий вплив навіть відносно низьких концентрацій хімічних сполук, які перевищують гігієнічні нормативи, спричиняє розвиток неспецифічних патологічних зрушень на молекулярному, клітинному та системному рівнях [3, 8)]. Атмосферні токсиканти (особливо важкі метали та азоту діоксид) мають виражену кумулятивну дію, що призводить до поступового накопичення пошкоджень у критичних органах та системах (серцево-судинній, дихальній, нервовій, кровотворній та імунній) [8-14]. У цьому зв'язку виникає нагальна потреба впровадження кількісних методів оцінки екологічних ризиків, які дозволяють закласти науково обґрунтовані орієнтири для розробки природоохоронних стратегій та прийняття управлінських рішень у сфері муніципальної безпеки довкілля [15, 16].

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю квантифікації шкоди здоров'ю населення в умовах тривалого техногенного забруднення атмосферного повітря обласних центрів Західної України, зокрема м. Тернопіль. Проблема оцінки та прогнозування ризиків скорочення тривалості життя (СТЖ) є надзвичайно важливою з огляду на сучасну демографічну кризу, зниження середньої очікуваної тривалості життя та зростання рівня смертності від хвороб системи кровообігу, органів дихання та новоутворень [7, 17, 18]. Застосування методології оцінки ризику на основі залежності «доза-ефект» дозволяє перекласти сухі дані моніторингу якості повітря у зрозумілі для органів державної влади та місцевого самоврядування показники скорочення років життя населення та величини індивідуального ризику. Це є підґрунтям для розробки цільових екологічних програм, зонування міських територій за рівнем небезпеки та розрахунку економічних збитків від екологічно зумовленої патології [15, 19, 20].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Наукова складова доробку полягає у поглибленні теоретико-методичних засад оцінки кумулятивної дії атмосферних забруднювачів на тривалість життя людини із урахуванням часового фактора експозиції та вікової структури населення. Практичне значення полягає у можливості безпосереднього використання отриманих результатів Департаментом екології та природних ресурсів Тернопільської ОДА, Управлінням екології та природних ресурсів Тернопільської міської ради, а також Державною екологічною інспекцією у Тернопільській області для вдосконалення системи регіонального екологічного моніторингу зони «Тернопільська» [19, 20].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та прикладно-методичні засади оцінки екологічного ризику здоров'ю населення висвітлено у фундаментальних працях вітчизняних та зарубіжних науковців. Зокрема, глибоку класифікацію та категоризацію чинників ризику у медицині та екології розроблено О.П. Фаюрою та співавторами [3]. Методологічні підходи до визначення екологічного ризику як ймовірності виникнення несприятливих наслідків для природних систем та людини розкрито В.М. Войціцьким зі співавторами [2], В.В. Добровольським [6] та В.І. Бредуном [16]. Нормативно-методичне забезпечення оцінки ризиків та вразливості в Україні зафіксовано у Методичних рекомендаціях Міндовкілля [15]. Застосування математико-статистичних методів і багатовимірної кластеризації екологічних даних викладено А.Т. Яровим та Є.М. Страховим [21].

Важливе місце серед останніх наукових публікацій посідають праці дослідників Одеської екологічної школи. У спільних публікаціях А.В. Колісник та Н.В. Грабко [18, 22] розкрито вплив метеорологічних чинників і регіональних екологічних факторів на показники смертності населення та поширення соматичних патологій. Дослідження Н.В. Грабко [17, 23] присвячені оцінці демографічних аспектів екологічної ситуації в регіонах Західної України та впливу несприятливих біокліматичних умов на стан здоров'я населення. Праці А.В. Колісник та О.І. Чернякової [4] заклали методичні основи використання дозиметричних моделей та оцінки ризиків скорочення тривалості життя під дією токсичних речовин різної хімічної природи. Розрахунки небезпеки ураження токсикантами та оцінку кумулятивності забруднювачів викладено у працях А.Л. Цикала [5]. Водночас еколого-токсикологічний профіль важких металів та газоподібних домішок ґрунтується на дослідженнях І.М. Трахтенберга [8] (свинець), В.С. Ткачишина [9] (манган), О. Скаб [10] (хром), С.В. Видиборця [11] (залізо), H. Zhao et al. [12] (кадмій), К.В. Корсака та О.В. Плахотнюка [13] (мідь), В.І. Тетієвського [14] (нікель).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених загальним питанням оцінки якості повітря в Україні, проблема деталізованої часової та вікової оцінки індивідуального ризику скорочення тривалості життя населення конкретних урбанізованих систем Західного регіону залишається недостатньо висвітленою. Зокрема, для м. Тернопіль відсутні систематичні наукові дослідження, які б поєднували багаторічні моніторингові дані (2016-2023 рр.) щодо вмісту важких металів та газоподібних забруднювальних речовин із кількісним розрахунком скорочення тривалості життя за залежністю «доза-ефект» для різних вікових груп (діти, молодь, особи похилого віку) при різних режимах експозиції.

Новизна. Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше на основі систематичних моніторингових даних двох стаціонарних постів м. Тернопіль за 8-річний період (2016-2023 рр.) здійснено комплексний розрахунок показників ймовірності перебування в умовах забрудненого атмосферного повітря, скорочення тривалості життя та індивідуального екологічного ризику за залежністю «доза-ефект» для 8 пріоритетних полютантів (NO_2, Pb, Mn, Cr^{6+}, Fe, Cd, Cu, Ni) з урахуванням трьох вікових категорій населення (14, 22 та 60 років) та різної тривалості щоденного перебування на відкритому повітрі (8 та 24 години).

Методичне або загальнонаукове значення. Методичне значення роботи полягає у формалізації та адаптації математичної моделі «доза-ефект» для розрахунку ризиків СТЖ від інгаляційного впливу атмосферного пилу, газів і важких металів у селітебних зонах міст. Модель спирається на використання питомих концентрацій речовин, летальних доз, умовно-розрахункової тривалості життя (100 років) та статистичних розподілів експозиції населення [4, 5]. Це забезпечує універсальність методу та можливість його застосування для інших міст України при розробці екологічних паспортів та стратегій сталого розвитку [15].

Викладення основного матеріалу. Відомо, що м. Тернопіль розташоване у центральній частині Тернопільської області на Подільській височині (уздовж берегів річки Серет). Площа міста становить понад 59 км², а чисельність наявного населення складає близько 225 тис. осіб [19, 20]. Рівнинно-хвилястий рельєф території міста у поєднанні із частими застійними явищами (температурними інверсіями та штилями в осінньо-зимовий період) сприяє накопиченню шкідливих речовин у приземному шарі атмосфери [1, 19, 24].

Основними джерелами антропогенного навантаження на атмосферне повітря міста є автотранспорт (забезпечує понад 75-80 % валових викидів), підприємства харчової промисловості (ТОВ «Радехівський цукор», молочні та м'ясопереробні комбінати), машинобудування, будівельної індустрії та об'єкти комунальної теплоенергетики [7, 19, 20]. Особливістю містобудівної структури Тернополя є перетинання житлових кварталів інтенсивними транзитними автошляхами державного значення, де спостерігається постійний потік важкого вантажного та пасажирського транспорту [25, 26].

Метод і математична модель оцінки ризику скорочення тривалості життя за залежністю «доза-ефект». Оцінка екологічного ризику скорочення тривалості життя спирається на концепцію кумулятивної токсичної дії хімічних речовин, аналогічну дозиметричним принципам у радіаційній гігієні [4, 5]. Токсична дія речовин, що надходять через органи дихання, є на декілька порядків вищою порівняно з пероральним надходженням за рахунок безпосереднього потрапляння токсикантів у велике коло кровообігу [3, 8]. Приймається умовно-розрахункова тривалість життя людини, яка дорівнює 100 рокам (36 500 діб) [4]. Розрахунок питомої концентрації забруднюючої речовини (K_{zabr}, мг/м³), яка відповідає межі потенційного скорочення життя на 100 років, здійснюється за формулою [4, 5]:

$$K_{zabr} = LK_{50} / (365 * 100) \quad (1)$$

де LK_{50} – середня смертельна (летальна) концентрація речовини в атмосферному повітрі, мг/м³; $365 \cdot 100$ – умовно-розрахунковий строк життя людини у днях.

Ймовірність перебування мешканця визначеного віку в умовах забрудненого повітря (Q_{fact}) розраховується з урахуванням тривалості щоденного перебування на відкритому повітрі [4]:

$$Q_{fact} = ((100 - t_1) * t) / (100 * 24) \quad (2)$$

де t_1 – вік людини, років; t – час перебування в умовах забрудненого атмосферного повітря, годин/добу; 100 – умовний строк життя (теоретична біологічна межа або еталонна/цільова тривалість життя), років; 24 – тривалість доби, годин.

Скорочення тривалості життя ($STZh_{zabr}$, років) під впливом фактичної концентрації токсиканта (K_{fakt}, мг/м³) визначається як [4, 5]:

$$STZh_{zabr} = (Q_{fact} * K_{fakt}) / K_{zabr} \quad (3)$$

Величина індивідуального екологічного ризику скорочення тривалості життя (R_{STZh}) розраховується за відношенням $STZh_{zabr}$ до умовного строку життя (100 років) [4]:

$$R_{STZh} = STZh_{zabr} / (365 * 100) \quad (4)$$

Відповідно до міжнародних та національних критеріїв екологічної безпеки [4, 15], прийнятним індивідуальним ризиком вважається величина $R_{STZh} \leq 1 \cdot 10^{-6}$ (що відповідає перебуванню в межах ГДКс.д.). Якщо $R_{STZh} > 1 \cdot 10^{-6}$, умови проживання класифікуються як небезпечні, що вимагає впровадження термінових природоохоронних заходів.

Еколого-токсикологічний профіль пріоритетних токсикантів у повітрі м. Тернопіль. Аналіз еко-

лого-токсикологічних властивостей досліджуваних речовин свідчить про їх високу небезпеку для організму людини [3, 8-14]: • *Діоксид азоту* (NO_2): гострий окисник, подразнює слизові оболонки дихальних шляхів, викликає бронхоспазм, хронічний бронхіт, набряк легень та емфізему [2, 3]; • *Свинець* (Pb): високотоксичний політропний отруйний метал, що блокує ферменти синтезу гему, ушкоджує ЦНС і периферичну нервову систему, нирки, печінку та кістковий мозок [8]; • *Манган* (Mn): політропний нейротоксикант, кумулюється в підкіркових ядрах головного мозку, викликає тяжкі ураження ЦНС (марганцевий паркінсонізм), пневмоконіоз та судинні розлади [9]; • *Шестивалентний хром* (Cr^{6+}): високонебезпечний канцероген I групи (IARC), викликає хромову інтоксикацію, виразкові ураження шкіри, мутації ДНК та рак легенів [10]; • *Залізо* (Fe): перевантаження залізом викликає вільнорадикальне окислення ліпідів, метаболічний ацидоз, ушкодження печінки та серцево-судинної системи [11]; • *Кадмій* (Cd): наднадзвичайно небезпечний канцероген та кумулятивний отруйний елемент з періодом напіввиведення 10-30 років, ушкоджує проксимальні канальці нирок, викликає остеомаляцію (хвороба Ітай-Ітай) та емфізему [12]; • *Мідь* (Cu): чинить гепатотоксичну, нефротоксичну та дерматотоксичну дію, розладнує функції травного тракту [13]; • *Нікель* (Ni): канцерогенний метал, викликає ушкодження ДНК, індукує алергічні дерматити, рак легень та носоглотки [14].

Динаміка забруднення атмосферного повітря та кратність перевищення ГДК. Вихідними даними для дослідження слугували офіційні спостереження Державної екологічної інспекції у Тернопільській області на двох стаціонарних постах м. Тернопіль за період 2016-2023 років [19, 25, 26]. Пост № 1 – перехрестя вул. Збаразька, Бродівська, Галицька (транспортно-промислова зона, репрезентативна для оцінки впливу викидів транспорту та промисловості). Пост № 2 – перехрестя вул. Микулинецька, Торговиця, Острозького, Гайова (житлово-транспортна зона з великим автовокзалом, центральним ринком та щільною житловою забудовою). Загалом аналізувалося 14 речовин (пил, SO_2, CO, NO_2, NO, формальдегід, Pb, Mn, Cr^{6+}, Fe, Cd, Cu, Ni, Zn). Для розрахунку ризиків СТЖ було відібрано 8 пріоритетних речовин (вимога методики), середньорічні концентрації яких перевищували рівень ГДКс.д. (табл. 1).

Результати розрахунку показників кратності перевищення ГДКс.д. для пріоритетних токсикантів в атмосферному повітрі м. Тернопіль репрезентовані графічно на рис. 1. Виявлено, що найвищі рівні перевищення гігієнічних нормативів зафіксовано за свинцем (перевищення ГДКс.д. у 133,3 рази у 2021 р. та у 100 разів у 2020 р.) та кадмієм (у 66,7 рази у 2019 р.). Вміст заліза перевищував норматив у 20,3 рази (2022 р.), нікелю – у 40 разів (2022 р.), мангану – у 30 разів (2022 р.), хрому – у 20 разів (2022 р.). Концентрації діоксиду азоту стабільно перевищували ГДКс.д. у 1,3 рази протягом 2020-2023 рр.

Розрахунок ймовірності перебування мешканців в умовах забрудненого повітря (Q_{fact}) (табл. 2) дозволив встановити ймовірність експозиційного впливу для мешканців м. Тернопіль залежно від їх віку (14 років – дитяче/підліткове населення, 22 роки – працездатне населення, 60 років – люди старшого віку) та тривалості перебування на відкритому повітрі (8 та 24 години на добу).

Таблиця 1

Середньорічні концентрації пріоритетних забруднюючих речовин у повітрі м. Тернопіль (2016–2023 рр.), мг/м³

Забруднююча речовина	ГДКс.д.	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Діоксид азоту (NO_2)	0,04	**0,197**	**0,043**	**0,043**	0,030	**0,050**	**0,050**	**0,050**	**0,050**
Свинець (Pb)	0,0003	—	0,00002	0,00002	**0,020**	**0,030**	**0,040**	**0,020**	**0,010**
Манган (Mn)	0,001	—	0,00002	0,00002	**0,020**	**0,020**	**0,020**	**0,030**	**0,010**
Хром (Cr^{6+})	0,0015	—	0,00002	0,00002	**0,020**	**0,020**	**0,020**	**0,030**	**0,010**
Залізо (Fe)	0,04	—	0,0007	0,0007	**0,800**	**0,069**	**0,770**	**0,810**	**0,660**
Кадмій (Cd)	0,0003	—	0,000002	0,000002	**0,020**	**0,003**	**0,003**	**0,006**	**0,008**
Мідь (Cu)	0,002	—	0,00003	0,00003	**0,030**	**0,030**	**0,030**	**0,040**	**0,020**
Нікель (Ni)	0,001	—	0,00002	0,00002	**0,020**	**0,020**	**0,030**	**0,040**	**0,020**

Таблиця 2

Ймовірність перебування мешканця в умовах забрудненого повітря (Q_{fact})

Вік людини (t_1), років	Час експозиції на добу (t), годин	Показник ймовірності (Q_{fact})
14 років (діти/підлітки)	8 годин	0,28
	24 години	0,86
22 роки (молодь/працездатні)	8 годин	0,26
	24 години	0,78
60 років (похилий вік)	8 годин	0,13
	24 години	0,40

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Найвищі значення ймовірності експозиційного впливу характерні для молодих вікових груп (Q_{fact} = 0,86 для 14 років та 0,78 для 22 років при 24-годинній експозиції). Для осіб віком 60 років Q_{fact} становить 0,40 при цілодобовому перебуванні та 0,13 при 8-годинному перебуванні на відкритому повітрі. І це природно, оскільки чим молодша людина, тим більше часу їй «залишається на дожиття» до еталонних 100 років.

Результати розрахунку індивідуального екологічного ризику скорочення тривалості життя (R_{STZh}) для кожного токсиканта за період 2016-2023 рр. для 24-годинної та 8-годинної експозиції населення різного віку представлено в табл. 3.

Детальний порівняльний аналіз отриманих результатів показує такі закономірності (рис. 2):

– Знаходження на відкритому повітрі забрудненому Діоксидом азоту (NO_2) у 2016 р. було небезпечним для всіх вікових категорій при 8- та 24-годинній експозиції (R_{STZh} = $1{,}05\cdot10^{-6}$ – $6{,}78\cdot10^{-6}$). У період 2020-2023 рр. ризик для осіб віком 14 та 22 років при цілодобовому перебуванні становив $(1{,}56\text{-}1{,}72)\cdot10^{-6}$, що перевищує прийнятний рівень ($1\cdot10^{-6}$) – червоний пунктир на рис. 2.

– Протягом 2019-2023 рр. рівень ризику негативного впливу від Свинцю (Pb) для всіх вікових категорій сягав критичних значень (10^{-4} - 10^{-3}), досягаючи піку у 2021 р. (R_{STZh} = $1{,}72\cdot10^{-3}$ для 14 років, 24 год).

– Знаходження в повітрі Хрому (Cr^{6+}) є небезпечним для всіх категорій населення з 2019 по 2023 рік, сягаючи максимального значення у 2022 р. (R_{STZh} = $5{,}16\cdot10^{-3}$).

– Піковий ризик від вмісту в атмосфері Кадмію (Cd) зафіксовано у 2019 р. (R_{STZh} = $3{,}44\cdot10^{-3}$), після чого відбулося зростання у 2022-2023 рр. до $1{,}38\cdot10^{-3}$.

– Важкі метали: Залізо, Нікель, Манган, Мідь протягом 2019-2023 рр. формували індивідуальні ризики, що суттєво перевищують гранично допустимий рівень ($1\cdot10^{-6}$), особливо для молодших вікових груп (14 та 22 роки) при експозиції 24 години на добу.

Головні висновки. На основі аналізу систематичних спостережень за якістю атмосферного повітря м. Тернопіль у 2016-2023 рр. визначено 8 пріоритетних забруднюючих речовин (NO_2, Pb, Mn, Cr^{6+}, Fe, Cd, Cu, Ni), вміст яких стабільно перевищував середньодобові ГДК. Найбільша кратність перевищення гігієнічних нормативів зафіксована за свинцем (у 133,3 рази у 2021 р.) та кадмієм (у 66,7 рази у 2019 р.), що свідчить про високе техногенне навантаження на повітряний басейн міста сполуками важких металів. Розрахунок показника ймовірності пере-

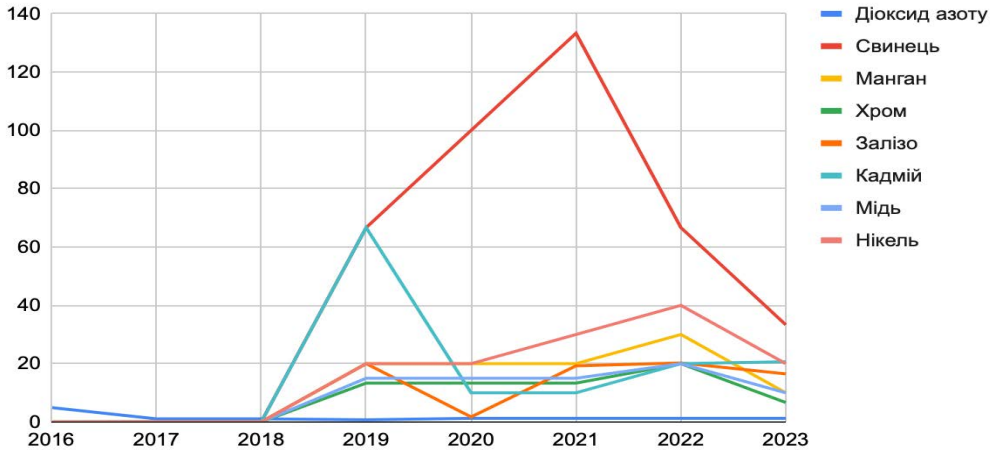

Рис. 1. Хід показника кратності перевищення ГДК (2016-2023 рр.)

Таблиця 3

Динаміка індивідуального екологічного ризику (R_{STZh}) за пріоритетними токсикантами у м. Тернопіль (2016-2023 рр.)

Речовина / Вік / Час	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
NO_2 (14 р. 24 год)	$6{,}78\cdot10^{-6}$	$1{,}48\cdot10^{-6}$	$1{,}48\cdot10^{-6}$	$1{,}03\cdot10^{-6}$	$1{,}72\cdot10^{-6}$	$1{,}72\cdot10^{-6}$	$1{,}72\cdot10^{-6}$	$1{,}72\cdot10^{-6}$
NO_2 (22 р. 24 год)	$6{,}15\cdot10^{-6}$	$1{,}34\cdot10^{-6}$	$1{,}34\cdot10^{-6}$	$9{,}36\cdot10^{-7}$	$1{,}56\cdot10^{-6}$	$1{,}56\cdot10^{-6}$	$1{,}56\cdot10^{-6}$	$1{,}56\cdot10^{-6}$
Pb (14 р. 24 год)	—	$1{,}15\cdot10^{-6}$	$1{,}15\cdot10^{-6}$	$1{,}15\cdot10^{-3}$	$1{,}15\cdot10^{-3}$	$1{,}72\cdot10^{-3}$	$1{,}15\cdot10^{-3}$	$5{,}73\cdot10^{-4}$
Pb (22 р. 24 год)	—	$1{,}04\cdot10^{-6}$	$1{,}04\cdot10^{-6}$	$1{,}04\cdot10^{-3}$	$1{,}04\cdot10^{-3}$	$1{,}56\cdot10^{-3}$	$1{,}04\cdot10^{-3}$	$5{,}20\cdot10^{-4}$
Cr^{6+} (14 р. 24 год)	—	$3{,}44\cdot10^{-6}$	$3{,}44\cdot10^{-6}$	$3{,}44\cdot10^{-3}$	$3{,}44\cdot10^{-3}$	$3{,}44\cdot10^{-3}$	$5{,}16\cdot10^{-3}$	$1{,}72\cdot10^{-3}$
Fe (14 р. 24 год)	—	$6{,}27\cdot10^{-7}$	$6{,}27\cdot10^{-7}$	$7{,}17\cdot10^{-4}$	$6{,}18\cdot10^{-5}$	$6{,}90\cdot10^{-4}$	$7{,}26\cdot10^{-4}$	$5{,}91\cdot10^{-4}$
Cd (14 р. 24 год)	—	$3{,}44\cdot10^{-7}$	$3{,}44\cdot10^{-7}$	$3{,}44\cdot10^{-3}$	$5{,}16\cdot10^{-4}$	$5{,}16\cdot10^{-4}$	$1{,}03\cdot10^{-3}$	$1{,}38\cdot10^{-3}$
Ni (14 р. 24 год)	—	$3{,}82\cdot10^{-7}$	$3{,}82\cdot10^{-7}$	$3{,}82\cdot10^{-4}$	$3{,}82\cdot10^{-4}$	$5{,}73\cdot10^{-4}$	$7{,}64\cdot10^{-4}$	$3{,}82\cdot10^{-4}$



Рис. 2. Результати розрахунку R_{STZh} від забруднення атмосферного повітря м. Тернопіль

бування мешканців в умовах забрудненого повітря показав, що він зростає зі збільшенням часу експозиції та є найвищим для дитячого населення (0,86 та 0,78 відповідно). Встановлено, що цілодобове знаходження на відкритому повітрі м. Тернопіль в умовах забруднення важкими металами (Pb, Cr^{6+}, Cd, Fe, Ni, Mn, Cu) впродовж 2019-2023 рр. є небезпечним для всіх вікових категорій населення ($R_{STZh} > 1 \cdot 10^{-6}$). Отримані результати розрахунку скорочення тривалості життя вказують на необхідність першочергового обмеження викидів автотранспорту та промислових об'єктів у селітебних зонах міста.

Перспективи використання результатів досліджень. Результати розрахунку екологічних ризиків скорочення тривалості життя слугуватимуть науковою основою для розробки просторових карт ізоризиків м. Тернопіль із використанням ГІС-технологій. Це дозволить оптимізувати розміщення нових стаціонарних постів спостереження в межах зони «Тернопільська», розробити рекомендації щодо функціонального зонування міських територій, оптимізації транспортних потоків (будівництво об'їзних магістралей) та впровадження жорстких екологічних стандартів для автотранспорту.

Література

1. Сафранов Т.А., Колісник А.В. Оптимізація природокористування: навчальний посібник для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 101-Екологія. Одеса: ОДЕКУ. 2024. 116 с. URL: http://eprints.onu.edu.ua/id/eprint/13067/1/SafranovT_OptPrir_NP_2024_116c.pdf (дата звернення: 10.09.2026)
2. Екологічні ризики: природа і критерії / Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В. та ін. *Екологічні науки*. 2020. № 4(31). С. 131-135. DOI: 10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.21
3. Чинники ризику: методика визначення й оцінювання, прогнозування в медицині (огляд літератури; приклади використання у власній клінічній практиці) – повідомлення перше / Фаюра О.П., Максимук А.О., Абрагамович О.О. та ін. *Lviv Clinical Bulletin.* 2021. № 1(33)–2(34). С. 59-64. DOI: 10.25040/lkv2021.01-02.051
4. Колісник А.В., Чернякова О.І. Збірник методичних вказівок до практичних робіт з дисципліни «Екологічна безпека» для бакалаврів. Одеса: ОДЕКУ, 2024. 89 с.
5. Кузьміна В.А. Екологічна безпека. Конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2020. 130 с.
6. Добровольский В.В. Екологічний ризик: причинно-наслідкові зв'язки в екосистемі. *Екологія. Наукові праці*. 2010. 132(119). С. 6-9. URL: http://ecology.chdu.edu.ua/article/view/64566 (дата звернення: 10.09.2026)
7. Державна служба статистики України. Населення України: Статистичний щорічник. Київ, 2022. 180 с. URL: https://stat.gov.ua/ sites/default/files/2024-02/Збірник%20Статистичний%20щорічник%20України%202022%20рік.pdf (дата звернення: 10.09.2026)
8. Трахтенберг І.М., Дмитруха Н.М., Луговський С.П. та ін. Свинець – небезпечний полютант: проблема стара і нова. *Сучасні проблеми токсикології.* 2018. № 2. С. 12-21. URL: https://protox.medved.kiev.ua/index.php/ua/issues/2015/3/item/450-lead-is-a-dangerous-pollutant-the-old-and-new-problem (дата звернення: 12.09.2026)
9. Ткачишин В.С. Інтоксикація марганцем: клініка, діагностика, лікування. *Медицина транспорту України.* 2019. № 1. С. 45-52.
10. Скаб О. Біологічні і токсикологічні ефекти хрому (VI) в організмі тварин і людини. Вісник ЛНАУ. 2020. № 24. С. 88-94.
11. Видиборець С.В. Метаболізм заліза і залізодефіцитні стани: монографія. Boston: Primedia eLaunch, 2022. 267 с.
12. Zhao H., Liu W., Wang Y. et al. Cadmium induces apoptosis in primary rat osteoblasts through caspase pathways. *J. Vet. Sci.* 2015. Vol. 16(3). Pp. 297-306. DOI: 10.4142/jvs.2015.16.3.297
13. Корсак К.В., Плахотнюк О.В. Основи екології: навч. посіб. 2-ге вид. Київ: МАУП, 2000. 296 с.
14. Тетієвський В.І Вип. 12. С. 102-109. URL: https://www.udau.edu.ua/assets/files/zbirniki/conference/ekologiya/Tetiyevskij.pdf (дата звернення:., Пушкарьова Т.М. Вплив нікелю та його сполук на здоров'я населення. Наукові праці УНУ. 2021. 13.09.2026)
15. Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Наказ № 386 від 02.06.2023 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0386926-23#Text (дата звернення: 14.09.2026)
16. Бредун В.І. Екологічна безпека та управління ризиками: навч. посіб. Полтава: Вид-во НУ ім. Ю. Кондратюка, 2021. 189 с. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/item/17418 (дата звернення: 14.09.2026)
17. Грабко Н.В. Демографічний аспект екологічної ситуації в регіонах Західної України. Євроінтеграція екологічної політики України: Матеріали Сьомої Всеукр. наук.-практ. конф. Одеса: ОДЕКУ, 2025. С. 185-189.
18. Грабко Н.В., Колісник А.В. Екологічні фактори впливу на смертність населення Одеської області. Український гідрометеорологічний журнал. 2024. № 33. С. 115-124. DOI: 10.31481/uhmj.33.2024.10
19. Екологічний паспорт Тернопільської області за 2023 рік / Департамент екології та природних ресурсів Тернопільської ОДА. Тернопіль, 2024. 112 с. URL: https://ecology.te.gov.ua/stan-dovkillya/ekologichnij-pasport-ternopilskoyi-oblasti/ (дата звернення: 27.09.2026)
20. Стратегія розвитку Тернопільської області на період до 2027 року / Тернопільська ОДА. Тернопіль, 2020. 86 с. URL: https://oda.te.gov.ua/storage/app/sites/26/економіка/strategia-oblasti-na-2021-2027-roku.pdf (дата звернення: 29.09.2026)
21. Яровий А.Т., Страхов Є.М. Багатовимірний статистичний аналіз: навч.-метод. посіб. Одеса: Астропринт, 2015. 132 с. URL: https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi75/0056336.pdf (дата звернення: 30.09.2026)
22. Грабко Н.В., Колісник А.В. Попередня оцінка ролі певних метеорологічних і біометеорологічних умов у формуванні смертності від COVID-19 в Одеській області. *Екологічні науки.* 2024. № 1(52), Т. 2. С. 129-134. DOI: 10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.2.24
23. Грабко Н.В. Вплив несприятливих біокліматичних умов на здоров'я людини (на прикладі м. Львів). Матеріали 80-ї звітної наук. конф. проф.-викл. складу ОНУ імені І. І. Мечникова. Одеса: ОНУ, 2025. С. 141–145.
24. Данова Т.Є., Катеруша Г.П. Аспекти екологічної кліматології: навч. посіб. Одеса: ТЕС, 2015. 184 с.
25. Екологічний паспорт Тернопільської області за 2022 рік / Департамент екології та природних ресурсів Тернопільської ОДА. Тернопіль, 2023. 108 с. URL: https://ecology.te.gov.ua/stan-dovkillya/ekologichnij-pasport-ternopilskoyi-oblasti/ (дата звернення: 27.09.2026)
26. Екологічний паспорт Тернопільської області за 2021 рік / Департамент екології та природних ресурсів Тернопільської ОДА. Тернопіль, 2022. 104 с. URL: https://ecology.te.gov.ua/stan-dovkillya/ekologichnij-pasport-ternopilskoyi-oblasti/ (дата звернення: 27.09.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 16.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026