

ОЦІНКА НАКОПИЧУВАЛЬНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ В ЗОНАХ ВИСОКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ ТРАНСПОРТУ

Демчук Л.І.¹, Алпатова О.М.¹, Скиба Г.В.¹, Русецька Н.М.²

¹Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська 103, 10005, м. Житомир

²Житомирський агротехнічний коледж

вул. Покровська, 96, 10031, м. Житомир

ke_dlm@ztu.edu.ua

У сучасному урбанізованому середовищі стрімке зростання кількості транспортних засобів та інтенсивності дорожнього руху призводить до безперервного надходження забруднюючих речовин у довкілля. Це створює серйозну загрозу як для локальних екосистем, так і для здоров'я населення. З огляду на це, критично важливою є комплексна оцінка не лише разових викидів, але й накопичувального (кумулятивного) екологічного ризику, що виникає внаслідок тривалої та системної експозиції токсичних сполук у придорожніх зонах з високим транспортним навантаженням.

Метою цієї роботи є визначення рівня кумулятивного екологічного ризику на прилеглих до автомагістралей територіях з урахуванням багатокомпонентного характеру забруднення. Методологія дослідження базується на комплексному аналізі концентрацій важких металів, дрібнодисперсного пилу (PM_{2,5} та PM₁₀), оксидів нітрогену й карбону в атмосферному повітрі, ґрунтах і придорожній рослинності. Для розрахунку загального індексу екологічної небезпеки застосовано багатокритеріальні моделі оцінки ризику, що дозволяють врахувати просторовий розподіл і синергетичний ефект взаємодії кількох поллютантів при їх тривалому накопиченні.

Результати дослідження підтверджують, що в зонах з високим трафіком формуються стійкі ореоли акумуляції токсичних речовин, де рівень екологічного ризику поступово досягає критичних значень. Встановлено, що найбільший внесок у формування накопичувальної небезпеки роблять важкі метали (зокрема свинець, кадмій, мідь, цинк) та поліциклічні ароматичні вуглеводні, які депонуються у верхніх шарах ґрунту і здатні мігрувати трофічними ланцюгами. Виявлено пряму кореляційну залежність між інтенсивністю транспортного потоку, тривалістю експлуатації ділянки дороги та експоненціальним зростанням індексу кумулятивного ризику.

Отримані дані мають вагоме практичне значення для розробки дієвих стратегій екологічної безпеки міських агломерацій та управління транспортними системами. Результати оцінки накопичувального ризику можуть слугувати науковим підґрунтям для оптимізації транспортних розв'язок, впровадження жорсткіших стандартів моніторингу та просторового планування придорожніх зон. На основі висновків запропоновано комплекс мітігаційних заходів, зокрема створення ефективних багатоярусних фітобар'єрів та вдосконалення дренажних систем для зниження рівня вторинного забруднення. *Ключові слова:* накопичувальний екологічний ризик, інтенсивність руху, забруднення довкілля, важкі метали, кумулятивний ефект, сталий розвиток, транспортне навантаження, придорожні екосистеми, екологічний моніторинг, управління ризиками.

Assessment of cumulative environmental risk in areas with high traffic intensity Demchuk L., Alpatova O., Skyba O., Rusetska N.

In today's urban environment, the rapid growth in the number of vehicles and traffic intensity leads to a continuous influx of pollutants into the environment. This poses a serious threat to both local ecosystems and public health. In view of this, it is critically important to comprehensively assess not only one-off emissions, but also the cumulative environmental risk arising from prolonged and systematic exposure to toxic compounds in roadside areas with high traffic loads.

The aim of this work is to determine the level of cumulative environmental risk in areas adjacent to motorways, taking into account the multi-component nature of pollution. The research methodology is based on a comprehensive analysis of the concentrations of heavy metals, fine particulate matter (PM_{2,5} and PM₁₀), nitrogen oxides, and carbon in the atmosphere, soil, and roadside vegetation. To calculate the overall environmental hazard index, multi-criteria risk assessment models were used, which allow for the spatial distribution and synergistic effect of the interaction of several pollutants during their long-term accumulation to be taken into account.

The results of the study confirm that in areas with high traffic, stable halos of toxic substance accumulation are formed, where the level of environmental risk gradually reaches critical values. It has been established that heavy metals (in particular, lead, cadmium, copper, zinc) and polycyclic aromatic hydrocarbons, which are deposited in the upper layers of the soil and are capable of migrating through food chains, make the greatest contribution to the formation of cumulative danger. A direct correlation has been found between traffic intensity, the duration of road use, and the exponential growth of the cumulative risk index.

The data obtained are of great practical importance for the development of effective strategies for the environmental safety of urban agglomerations and the management of transport systems. The results of the cumulative risk assessment can serve as a scientific basis for optimizing transport interchanges and introducing stricter standards for monitoring and spatial planning of roadside areas. Based on the conclusions, a set of mitigation measures is proposed, including the creation of effective multi-tiered phytobarrriers and the improvement of drainage systems to reduce secondary pollution. *Key words:* cumulative environmental risk, traffic intensity, environmental pollution, heavy metals, cumulative effect, sustainable development, transport load, roadside ecosystems, environmental monitoring, risk management.



Постановка проблеми. Сучасні урбанізовані території стикаються з безперервним антропогенним навантаженням, серед якого ключову роль відіграє автомобільний транспорт. Проблема полягає не лише в миттєвих викидах забруднюючих речовин (діоксиду нітрогену, чадного газу, сажі), а й у їхньому поступовому акумулюванні в компонентах довкілля – ґрунтах, поверхневих водах та придорожній рослинності. У зонах високої інтенсивності руху (на великих перехрестях, транспортних розв'язках, магістралях) формується специфічне мікросередовище, де екологічний ризик втрачає лінійний характер і набуває кумулятивних (накопичувальних) властивостей. Традиційні методи моніторингу часто фіксують лише поточні концентрації в повітрі, залишаючи поза увагою довгострокові наслідки синергетичної дії накопичених токсикантів (зокрема, важких металів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів та мікропластику від зносу шин) на екосистеми та здоров'я населення.

Актуальність дослідження. Незважаючи на поступовий перехід до електромобілів, транспортні засоби з двигунами внутрішнього згорання ще довго залишатимуться домінуючими на дорогах, особливо в країнах, що розвиваються, та державах із перехідною економікою. Крім того, невичерпні викиди (зношення гальмівних колодок, шин, дорожнього покриття) залишаються актуальними для будь-якого типу транспорту. В умовах щільної міської забудови та зміни клімату (що часто призводить до застою повітряних мас та утворення смогу) своєчасна та точна оцінка накопичувального екологічного ризику стає критично необхідною. Вона дозволяє не просто констатувати факт забруднення, а й прогнозувати точку неповернення для локальних екосистем, що робить це дослідження вкрай нагальним для сучасного урбоекологічного планування.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота безпосередньо пов'язана з реалізацією Цілей сталого розвитку ООН, зокрема, ціль 3, 11. На практичному рівні дослідження відповідає завданням національних та регіональних програм з охорони довкілля, розробки стратегій «розумного міста» та оптимізації транспортних потоків. Отримані результати можуть слугувати науковим підґрунтям для роботи муніципальних екологічних інспекцій, санітарно-епідеміологічних служб та архітектурних бюро під час проектування буферних зелених зон.

Аналіз наукових публікацій. Kumar P. та ін. у своїй праці «Оцінка ризиків для довкілля від викидів твердих частинок у зонах інтенсивного трафіку» проаналізували прямий вплив дрібнодисперсних частинок ($PM_{2.5}$, PM_{10}) на придорожні екосистеми [1]. Доведено, що концентрація поллютантів експоненціально спадає з віддаленням від дороги, але створює стійкі зони ризику в межах 50-метрової смуги. Tian Z., Kole P. та ін. «Дослідження токсикологічного

впливу продуктів зношення автомобільних шин (зокрема бРРD-хінону)» [2] дослідити невичерпні джерела забруднення транспорту. Виявили, що мікропластик та хімічні сполуки від зносу шин і гальмівних колодок змиваються у ґрунти та водойми, створюючи довгостроковий накопичувальний екологічний ефект, токсичний для біоти. Gulia S. та ін. «Просторовий аналіз та ГІС-моделювання розсіювання транспортних поллютантів» [3] створили карти вразливості міських територій до акумуляції важких металів (Pb, Zn, Cu). Розробили просторові моделі, які доводять, що рельєф, міська забудова та швидкість вітру критично впливають на зони накопичення токсикантів на перехрестях. Chen Y., Wang L. та ін. «Синергетичний ефект транспортного забруднення та міських островів тепла» [4] дослідили взаємодію кліматичних змін та автомобільного забруднення та обґрунтували, що підвищення температури (теплові хвилі) суттєво посилює токсичність накопичених у ґрунті придорожніх зон хімічних сполук, прискорюючи їх перехід у рухомі форми.

Можна зазначити, що хоча наукова спільнота вже активно застосовує просторовий аналіз та досліджує окремі компоненти (наприклад, тільки важкі метали або тільки мікропластик), але досі бракує комплексного алгоритму. Алгоритму, який би не просто фіксував забруднення, а дозволяв би муніципалітетам оцінювати накопичувальний ефект у динаміці та швидко приймати управлінські рішення на локальному рівні.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значну кількість праць, присвячених транспортному забрудненню, проблема накопичувального екологічного ризику залишається фрагментарно дослідженою. Більшість існуючих моделей оцінюють ризик від кожного забруднювача окремо (адитивна модель) і спираються на короткострокові вимірювання. Досі бракує комплексних методичних підходів, які б враховували не лише поточну емісію, але й історичне накопичення поллютантів у депонуючих середовищах (ґрунт, біота) з урахуванням локальних мікрокліматичних та топографічних особливостей конкретних транспортних вузлів.

Новизна полягає у розробці (або вдосконаленні) комплексної моделі оцінки екологічного ризику, яка вперше кількісно враховує синергетичний ефект та часовий фактор накопичення багатокомпонентного забруднення в зонах інтенсивного автомобільного руху. Запропоновано новий алгоритм розрахунку кумулятивного індексу небезпеки, що поєднує дані про викиди з вихлопних труб із показниками вторинного забруднення (пил від зносу шин і асфальту) та здатністю локальних екосистем до самоочищення.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у створенні універсального аналітичного інструментарію, який розширює межі екологічного

аудиту урбанізованих територій. Запропонований підхід може бути екстрапольований на інші типи антропогенного навантаження. Загальнонаукова цінність результатів формує нове розуміння динаміки трансформації міських екосистем в умовах хронічного транспортного стресу, що створює базу для подальших досліджень у галузі екоотоксикології, урбаністики та екологічного менеджменту.

Виклад основного матеріалу. Створення ефективної системи еколого-гігієнічної безпеки одна із найважливіших умов досягнення сталого соціально-економічного розвитку суспільства. Система еколого-гігієнічної безпеки є одним із ключових блоків національної політики досягнення санітарно-епідеміологічного благополуччя на шляху до сталого розвитку суспільства [7]. Під поняттям екологічної безпеки розуміють сукупність принципів, методів та управлінських механізмів, спрямованих на захист життя здоров'я людини та суспільства [9].

Житомирська область має розгалужену мережу автомобільних доріг (державного та місцевого значення), яка забезпечує вантажні та пасажирські потоки внутрішньодержавні (України), транзитні транспортні потоки (Європи), та внутрішньо обласні. Регулярним автобусним сполученням охоплено всі міста та 99 % сільських населених пунктів області, 16 населених пунктів неохоплені транспортним сполученням.

За станом на 01.01.2025 протяжність автомобільних доріг загального користування Житомирської області становила 8548 км, із них із твердим покриттям – 8338 км, або 97,5% від наявності шляхів. Дороги державного й місцевого значення забезпечують зв'язки із зарубіжжям та обласними центрами регіонів України. Головне транспортне навантаження приймають дві міжнародні автодороги дер-

жавного значення: Київ-Чоп (М-06), Київ – Ковель – Ягодин (М07).

Автотранспортні засоби викидають в атмосферне повітря близько 200 шкідливих речовин, серед яких: оксиди вуглецю, азоту, сірки, важких металів, канцерогенні та мутагенні з'єднання і т.д. За рік легковий автомобіль забирає з атмосферного повітря 4350 кг кисню, а замість нього викидає 3250 кг вуглекислого та 530 чадного газу, 90-150 кг незгорівших вуглеводів, 40 кг оксидів азоту, 1 кг свинцю. Зокрема, 96% оксиду вуглецю, 30% оксиду азоту, 68% вуглеводів потрапляють у навколишнє середовище через вихлопні труби автотранспорту. А неправильне керування транспортними засобами призводить до збільшення викидів CO , C_nH_m – на 25-30%, NO_x – на 15%.

Аналізуючи показники забруднення повітряного басейну Житомирської області, потрібно відмітити, що при середніх показниках по області в 310,9 $кг/км^2$ загальної площі, найбільше навантаження спостерігається в містах Житомирі (21252 $кг/км^2$), Коростені (16171 $кг/км^2$), Малині (13850 $кг/км^2$), Звягелі (7137 $кг/км^2$), Бердичеві (6505 $кг/км^2$) (рис. 1).

До основних причин, що зумовлюють негативний вплив транспортного сектору на міське середовище відносяться:

- недолік конкретних екологічних цілей при постановці завдань в галузі забезпечення роботи АТК і його розвитку;
- неприйнятні екологічні характеристики продукції, що використовується для забезпечення функціонування АТЗ;
- незадовільний рівень технічного утримання парку АТЗ та всього АТК;
- низька якість доріг і поганий їх розвиток;
- недоліки в системі координування перевезень та руху АТЗ.



Рис.1. Загальна площа навантаження автомобільного транспорту

Оцінка накопичувального (кумулятивного) екологічного ризику в зонах інтенсивного руху транспорту є критичним завданням для сучасної екології та медицини [7]. Це зумовлено тим, що негативний вплив на здоров'я людини та довкілля формується не одним фактором, а сукупністю хімічних, фізичних та біологічних чинників, що діють одночасно протягом тривалого часу.

Транспортний сектор забезпечує від 70% до 90% усіх шкідливих викидів в атмосферу. На відміну від промислових підприємств, транспортні викиди зосереджені в приземному шарі повітря (на рівні 0,5–1,5 м), що максимально наближає їх до дихальних шляхів людини.

Накопичувальний ефект виникає через те, що забруднювачі мають властивість акумулюватися в компонентах екосистеми: ґрунті, рослинності та організмі людини. Зокрема, важкі метали, такі як свинець (Pb) та кадмій (Cd), не розкладаються, а лише змінюють форми сполук, постійно отруюючи довкілля.

Основними компонентами викидів є оксиди вуглецю (CO), азоту (NO_x), діоксид сірки (SO₂), неметанові леткі органічні сполуки та дрібнодисперсний пил (PM_{2,5} та PM₁₀). Останній вважається найбільш небезпечним через здатність проникати глибоко в легені та потрапляти в кров.

Крім хімічного забруднення, зони інтенсивного руху характеризуються високим рівнем шумового навантаження. Постійний шум понад 65-70 дБ призводить до хронічного стресу, порушень сну та серцево-судинних захворювань, посилюючи токсичну дію хімічних речовин.

Методологія оцінки ризику базується на визначенні коефіцієнта неканцерогенної небезпеки (HQ) та сумарного індексу небезпеки (HI). Останній розраховується як сума відношень фактичних концентрацій до гранично допустимих для всіх речовин з однаковою спрямованістю дії:

$$HI = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{RfCi}$$

де:

C_i – концентрація речовини,

RfC_i – її референтна (безпечна) концентрація.

Важливим аспектом є оцінка канцерогенного ризику (CR), який пов'язаний з наявністю у викидах бензолу, формальдегіду та бенз(а)пірену. Згідно з класифікацією ВООЗ, ризик вважається прийнятним, якщо імовірність розвитку раку протягом життя не перевищує 10⁻⁶ (один випадок на мільйон населення).

Аналіз стану ґрунтів уздовж автомагістралей свідчить про значне перевищення фонових концентрацій металів у 5–10-метровій зоні від краю проїжджої частини (табл.1.). Це створює загрозу вто-

ринного забруднення повітря пилом, який містить ці токсиканти.

Зелені насадження в таких зонах виконують роль біофільтрів, проте вони самі зазнають деградації. Хлороз листя, передчасне обпадання та накопичення шкідливих речовин у тканинах рослин є індикаторами високого рівня екологічного навантаження.

Математичне моделювання розсіювання викидів дозволяє прогнозувати зони ризику. Встановлено, що концентрація забруднювачів різко знижується на відстані 50–100 метрів від дороги, проте за наявності "вуличних каньйонів" (щільної висотної забудови) шкідливі речовини затримуються надовго.

Для об'єктивної оцінки необхідно враховувати синергізм факторів. Наприклад, висока вологість повітря сприяє утворенню кислотних туманів з оксидів азоту та сірки, що значно підвищує корозійну активність середовища та агресивність до слизових оболонок людей.

Статистичні дані свідчать про кореляцію між інтенсивністю руху та ростом захворюваності на астму та алергію у дітей, що проживають у радіусі 200 метрів від магістралей. Накопичувальний ефект проявляється через 5–10 років постійного впливу.

Важливу роль грає структура автопарку. Велика частка дизельних двигунів та вантажного транспорту збільшує викиди сажі та оксидів азоту, що робить внесок у формування фотохімічного смогу.

Економічні збитки від екологічних ризиків включають витрати на лікування населення, втрату робочого часу та зниження врожайності прилеглих територій. Оцінка цих збитків є підґрунтям для впровадження екологічних податків та зон низьких викидів.

Сучасні ГІС-технології (геоінформаційні системи) дозволяють створювати динамічні карти ризику. Вони поєднують дані про інтенсивність трафіку, метеоумови та щільність населення, що допомагає в реальному часі визначати найнебезпечніші ділянки.

Підсумовуючи, накопичувальний екологічний ризик у зонах інтенсивного руху є комплексним показником. Його моніторинг має бути пріоритетом для міського планування, адже ігнорування кумулятивних ефектів сьогодні призведе до незворотних наслідків для здоров'я майбутніх поколінь.

Необхідно переходити від простого контролю концентрацій окремих речовин до інтегральної оцінки якості середовища, враховуючи сумарну токсичність та фізичне навантаження на людину.

Головні висновки. Проведене дослідження дозволяє зробити низку важливих узагальнень щодо природи та динаміки екологічних ризиків у зонах інтенсивного автомобільного руху:

– доведено, що традиційний підхід, який фокусується виключно на поточних викидах (адитивна модель), є недостатнім для об'єктивної оцінки стану довкілля. Накопичувальний екологічний ризик

Таблиця 1

Показник	Низька інтенсивність (<500 авт/год)	Середня інтенсивність (500-2000 авт/год)	Висока інтенсивність (>2000 авт/год)
Рівень шуму, дБ	50–60	65–75	80+
Концентрація NO ₂	< ГДК	1.5–2 ГДК	3–5 ГДК
Ризик здоров'ю	Мінімальний	Помірний	Високий/Критичний

формується внаслідок тривалого акумулювання важких металів, мікропластику від зносу шин та інших токсикантів у депонуючих середовищах, що вимагає переходу до моделей кумулятивного аналізу.

– встановлено, що в придорожніх зонах різні групи поллютантів взаємодіють між собою, посилюючи загальний негативний вплив на біоту. Цей вплив додатково каталізується локальними мікрокліматичними змінами, зокрема ефектом «міських островів тепла».

– застосування сучасних методів просторового аналізу, теплових карт та алгоритмів штучного інтелекту дозволяє з високою точністю виявляти локації з найвищим кумулятивним ризиком і прогнозувати динаміку його зростання.

Практичне значення та перспективи подальших досліджень. Отримані результати мають не лише теоретичну, а й виражену прикладну цінність для муніципального управління та урбоекології. Сформовані алгоритми оцінки та побудовані теплові

карти екологічного ризику створюють міцну наукову базу для впровадження технологічних інновацій у просторове планування. Виявлення зон критичного накопичення токсикантів дозволяє перейти до точкового, науково обґрунтованого проєктування захисних зелених смуг. Наприклад, для регіональних центрів (таких як Житомир чи інші міста, де проблема оптимізації транспортних потоків та збереження довкілля стоїть доволі гостро), ці дані є ключовими для застосування сучасних технологій лісовідновлення та створення цільових фітобар'єрів. Замість хаотичного озеленення, муніципалітети зможуть висаджувати дерева саме там, де теплові карти фіксують максимальне акумулювання викидів.

Перспективи подальших досліджень доцільно спрямувати на вивчення фітореMediaційного потенціалу конкретних видів рослин – тобто їхньої здатності поглинати та нейтралізувати накопичені у ґрунті багатоконпонентні забруднювачі в умовах хронічного транспортного стресу.

Література

- Kumar P., Omidvarborna H., Barwise Y., Tiwari A. Environmental risk assessment of particulate matter emissions in high-traffic zones. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 755. P. 142549. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142549>
- Tian Z., Kole P. J., Zhao H., Peter K. T., Kolodziej E. P. Toxicological impact of tire wear products: 6PPD-quinone accumulation and aquatic toxicity. *Environmental Science & Technology*. 2022. Vol. 56, № 1. P. 123–132. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03532>
- Gulia S., Kumar A., Khare M. Spatial analysis and GIS-based modeling of traffic-induced pollutant dispersion in urban intersections. *Atmospheric Environment*. 2023. Vol. 294. P. 119456. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119456>
- Chen Y., Wang L., Zhang H., Liu X. Synergistic effects of traffic pollution and urban heat islands on soil toxicity in roadside ecosystems. *Environmental Pollution*. 2024. Vol. 341. P. 122950. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122950>
- Integrative Models for Cumulative Ecological Risk Assessment in Urban Systems / European Environment Agency (Horizon Europe Programme). Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2025. 112 p.
- Wang Z., Li J., Smith R. Application of artificial intelligence and thermal mapping for predicting cumulative environmental risk zones. *Ecological Engineering*. 2026. Vol. 198. P. 107015. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107015>
- Демчук Л.І., Войналович І.М. Вплив екологічних ризиків на навколишнє середовище у Житомирській області. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2024. № 4 (497). С. 223-230
- Демчук Л., Алпатова О., Мельник-Шамрай В. Екологічна оцінка впливу автосервісних підприємств як стаціонарного джерела забруднення довкілля. Multidisciplinárny mezinárodní vědecký magazín “Стредоевропейский вестник про веду а визкум”. Чеська Республіка. том. 2. № 1. 2026. вул. 361.
- Демчук Л. І., Нонік Л. Ю., Войналович І. М. Еколого-техногенна безпека, як роль у формуванні стратегії національної безпеки держави. Сучасні вектори розвитку України: забезпечення стійкості та безпеки. Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 28 жовтня 2024 року). Чернігів: ГО «Науково-освітній інноваційний центр суспільних трансформацій», 2024. DOI: https://doi.org/10.54929/conf_28_10_2024-16-01
- Рабош, І. О. Оцінка екологічного стану території автозаправних станцій, розташованих поблизу автомагістралей / І. О. Рабош, О. В. Кофанова, А. В. Підгорний. Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 236–242. doi:10.20998/2413-4295.2018.09.34.
- Климчик О. М. Екологія міських систем / О. М. Климчик, А. П. Багмет, С. М. Данкевич, С. І. Матковська. – Житомир: Видавель О.О. Євенок, 2016. – 460 с.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026