

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-03>
УДК 504.3.054:519.2

С. Я. АДАМЕНКО¹,
аспірант кафедри екології
e-mail: stanislav.adamenko-a101-23@nung.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1678-0036>

Л. М. АРХИПОВА¹, д-р техн. наук,
професорка кафедри екології
e-mail: konsevich@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8725-6943>

¹Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15; м. Івано-Франківськ; 76019; Україна

ОЦІНКА ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВОГО ХАРАКТЕРУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН

Мета. Аналіз стану атмосферного повітря, визначення основних факторів формування забруднення та обґрунтування методики оцінювання гарантованої якості повітря з урахуванням випадкового характеру концентрацій забруднювальних речовин

Методи. Статистичні та розрахунок комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА).

Результати. Дослідження проведено на основі даних станції громадського моніторингу Eco-City станції №1162 в районі хімічного факультету Ужгородського національного університету з урахуванням кліматичних і орографічних особливостей території. Встановлено, що основним джерелом забруднення атмосферного повітря є автотранспорт. Виявлено виражену сезонність змін концентрацій забруднювальних речовин. Формальдегід визначено головним чинником перевищення індексів забруднення атмосфери, при цьому значення КІЗА часто відповідали рівню «дуже високого» забруднення. Найбільш критичні показники зафіксовано: для формальдегіду – протягом усього року з максимальними значеннями у січні та липні; для дрібнодисперсного пилу PM_{2.5} і PM₁₀ – у зимовий період через вплив опалювального сезону та несприятливих умов розсіювання; для діоксиду азоту – у квітні, що пов'язано з транспортним навантаженням. Оцінка якості атмосферного повітря засвідчила систематичне перевищення нормативів для формальдегіду протягом року.

Висновки. Результати дослідження свідчать про напружений екологічний стан атмосферного повітря в районі дослідження та необхідність посилення контролю за викидами забруднюючих речовин. Пріоритетними заходами є оптимізація транспортних потоків, зменшення викидів у період опалювального сезону та вдосконалення локальних систем моніторингу атмосферного повітря, особливо щодо контролю джерел формальдегіду.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: атмосферне повітря, індекс забруднення атмосфери, забруднюючі речовини, концентрації елементів, гарантована якість

Як цитувати: Адаменко С. Я., Архипова Л. М. Оцінка якості атмосферного повітря з урахуванням випадкового характеру концентрацій забруднюючих речовин. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 42-53. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-03>

In cites: Adamenko, S. Y., & Arkhypova, L. M. (2026). Assessment of atmospheric air quality considering the stochastic nature of pollutant concentrations. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (34), 42-53. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-03> (in Ukrainian)

Вступ

Якість атмосферного повітря є одним із ключових чинників, що визначають екологічний стан територій та рівень безпеки населення. У сучасних умовах урбанізації та інтенсивного розвитку транспортної інфраструктури проблема накопичення забруднюючих

речовин у повітрі набуває особливої актуальності. За даними міжнародних екологічних організацій, значна частина населення світу постійно перебуває під впливом концентрацій домішок, що перевищують рекомендовані нормативні значення [1, 2].

В Україні проблеми погіршення якості повітря особливо актуальні у великих містах та промислових регіонах, де спостерігається перевищення гігієнічних нормативів (ГДК) за ключовими забруднювачами (PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO, озон) [3]. Попри нормативно-правові акти та міжнародні директиви, ефективний контроль та оцінка стану атмосферного повітря залишається недостатньо реалізованою, що обумовлює потребу у наукових дослідженнях щодо моніторингу, математичного моделювання та прогнозування забруднення [4].

У науковій літературі значна увага приділяється впливу атмосферного забруднення на здоров'я населення та функціонування екосистем. Дослідження Di et al. підтверджують наявність статистично значущого зв'язку між тривалим впливом забрудненого повітря та зростанням рівня смертності населення [5]. Результати міжнародних досліджень також свідчать, що дрібнодисперсні частинки, оксиди азоту та вторинні органічні сполуки є одними з найбільш небезпечних компонентів міського повітряного середовища.

Відповідно до даних дослідження «Global Burden of Disease» Інституту метрики та оцінки здоров'я (IHME), у 2024 році наслідком впливу забрудненого повітря стала смерть майже 4,9 млн осіб [6]. У структурі світової смертності це становить близько 9 % від загальної кількості летальних випадків [7].

Особливу увагу дослідники приділяють формальдегіду як одному з найнебезпечніших вторинних забруднювачів. У роботах Wu et al. встановлено, що формальдегід бере активну участь у процесах фотохімічного смогоутворення та формуванні вторинних аерозолів [8]. Liu et al. довели вагому роль транспортних викидів у формуванні підвищених концентрацій формальдегіду в урбанізованих районах із високою інтенсивністю руху транспорту [9].

Окрему увагу сучасні дослідники приділяють питанням зменшення антропогенного навантаження на атмосферне повітря у містах. Зокрема, Manzueta et al. підкреслюють ефективність комплексних заходів щодо скорочення викидів у житловому секторі та в опалювальний період для покращення якості атмосферного повітря [10]. Це свідчить про необхідність впровадження сучасних систем моніторингу та розроблення нових підходів до оцінювання якості атмосферного повітря з урахуванням випадкового характеру кон-

центрацій забруднювальних речовин.

Під час оцінювання стану атмосферного повітря у населених пунктах та в межах виробничих територій основним орієнтиром виступають гігієнічні нормативи – гранично допустимі концентрації хімічних і біологічних домішок. Дотримання встановлених нормативних значень спрямоване на обмеження негативного впливу забруднювальних речовин на здоров'я людини та забезпечення безпечних умов проживання населення [11, 12].

У працях, присвячених моніторингу атмосферного повітря, підкреслюється необхідність застосування комплексних підходів до оцінювання екологічного стану територій [13]. Значного поширення набули методики розрахунку індексу забруднення атмосфери (ІЗА), які дозволяють оцінювати рівень антропогенного навантаження та порівнювати екологічний стан різних міст і регіонів.

Сучасні дослідження також акцентують увагу на доцільності використання імовірнісних та статистичних методів оцінювання якості атмосферного повітря. Це пов'язано з тим, що концентрації забруднювальних речовин мають випадковий характер і змінюються під впливом метеорологічних умов, сезонних факторів та інтенсивності викидів [14].

Попри значну кількість наукових праць, питання оцінювання гарантованої якості атмосферного повітря з урахуванням стохастичного характеру концентрацій забруднювачів залишається недостатньо дослідженим [15]. Саме тому актуальним є вдосконалення підходів до аналізу стану повітряного середовища на основі інтегральних та імовірнісних показників.

Під «гарантованою якістю атмосферного повітря» у роботі розуміється такий стан повітряного середовища, за якого з певною статистичною ймовірністю концентрації забруднюючих речовин не перевищують встановлені гігієнічні нормативи. Таким чином, показник гарантованої якості характеризує ступінь екологічної безпеки атмосферного повітря з урахуванням випадкової мінливості концентрацій домішок у часі.

Метою роботи є аналіз стану атмосферного повітря, визначення основних факторів формування забруднення та обґрунтування методики оцінювання гарантованої якості повітря з урахуванням випадкового характеру концентрацій забруднювальних речовин.

Матеріали і методи

Для проведення дослідження використувалися результати спостережень за станом атмосферного повітря, отримані з відкритої системи громадського моніторингу Eco-City. Аналіз виконано на основі даних станції №1162, яка розташована поблизу хімічного факультету Ужгородського національного університету.

Слід зазначити, що система громадського моніторингу Eco-City базується на використанні сенсорних модулів, результати яких можуть містити додаткові невизначеності порівняно з сертифікованими державними постами спостережень. Калібрування сенсорів здійснювалося відповідно до процедур, передбачених платформою Eco-City, а отримані результати порівнювалися з фізично допустимими діапазонами концентрацій.

Для підвищення достовірності аналізу використовувалися процедури попередньої обробки даних, зокрема видалення аномальних значень, перевірка часової узгодженості вимірювань та усереднення короткоперіодичних коливань.

Під час аналізу враховувалося, що типові похибки сенсорів громадського моніторингу, за даними літературних джерел, можуть становити 10-20% залежно від типу забруднюючої речовини та метеорологічних умов [16]. Пропуски даних, які не перевищували 5% від загального масиву спостережень, не включалися до статистичного аналізу.

Досліджувалися концентрації формальдегіду, аміаку, діоксиду азоту, оксиду вуглецю та дрібнодисперсних твердих частинок PM_{2.5} і PM₁₀. Також враховувалися супутні метеорологічні параметри: температура повітря, атмосферний тиск та відносна вологість.

Для аналізу були обрані дані спостережень за січень, квітень, липень та жовтень 2023 року. Такий вибір дозволив оцінити сезонні особливості зміни рівнів забруднення атмосферного повітря. Первинні показники концентрацій були приведені до єдиної системи одиниць вимірювання, що забезпечило можливість подальших розрахунків.

Оцінювання рівня забруднення виконувалося із застосуванням індексу забруднення

атмосфери (ІЗА) та комплексного індексу забруднення атмосферного повітря. Для кожної речовини визначався ступінь перевищення нормативних значень гранично допустимих концентрацій.

У процесі дослідження концентрації забруднювальних речовин розглядалися як випадкові величини, значення яких змінюються під впливом природних і антропогенних факторів [17-19]. Для оцінювання гарантованої якості атмосферного повітря використовувався імовірнісний підхід, заснований на визначенні частоти випадків, коли концентрації не перевищували встановлені нормативи [20-21].

Концентрації забруднюючих речовин розглядалися як випадкові величини, для яких визначалися основні статистичні характеристики: середнє значення, медіана, стандартне відхилення та коефіцієнт варіації. Для перевірки характеру розподілу даних застосовувався критерій Шапіро-Уїлка. У випадках відхилення розподілу від нормального використовувалися непараметричні оцінки та аналіз емпіричних частот перевищення гранично допустимих концентрацій.

Імовірність гарантованої якості атмосферного повітря оцінювали як статистичну ймовірність неперевищення нормативних значень:

$$P = \frac{m_c}{m}, \quad (1)$$

де m_c – кількість випадків, коли концентрація не перевищувала ГДК;

m – загальна кількість спостережень.

Для оцінювання статистичної надійності отриманих імовірнісних оцінок визначалися 95% довірчі інтервали на основі біноміального розподілу:

$$CI = p \pm 1.96 \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}, \quad (2)$$

де p – оцінена ймовірність неперевищення нормативу,

n – кількість спостережень.

Отримані результати дозволили оцінити рівень екологічної безпеки території дослідження та визначити речовини, які найбільше впливають на формування забруднення атмосферного повітря.

Результати та обговорення

За особливостями метеорологічних умов місто Ужгород характеризується підвищеним потенціалом накопичення забруднювальних речовин у атмосферному повітрі та

недостатньо сприятливими умовами для розсіювання промислових викидів [22]. Важливу роль у цьому відіграє географічне положення міста, яке обмежує інтенсивність природного

повітрообміну. Значну частину року, приблизно 65–67 % днів, спостерігаються штильові умови або дуже слабкий вітер зі швидкістю до 1 м/с. За таких умов домішки тривалий час утримуються у приземному шарі атмосфери, що сприяє формуванню смогових явищ та подальшому осіданню забруднювальних речовин. Основними джерелами забруднення атмосферного басейну міста є як стаціонарні об'єкти, так і пересувні джерела викидів, серед яких провідну роль відіграє автомобільний транспорт.

Моніторинг забруднення повітря в місті Ужгороді проводиться лабораторією спостережень за забрудненням повітря (ЛСЗА) Закарпатського ЦГМ, починаючи з 1992-го року. Стан атмосферного повітря м. Ужгород контролюється на двох стаціонарних базових постах спостереження (ПСЗ), які розташовані: ПСЗ №1 – в адміністративно-житловому районі міста, проспект Свободи, 2; ПСЗ № 2 – в промисловому районі, вул. Сергія Мартина.

Відбір проб повітря проводиться 4 рази на добу (для визначення вмісту діоксиду сірки, діоксиду та оксиду азоту, формальдегіду) та 2 рази на добу (для визначення вмісту пилу, розчинних сульфатів, оксиду вуглецю, 8 важких металів), крім вихідних та святкових днів. Засоби виміральної техніки, що використовуються в роботі, проходять державну повірку.

За даними державних статистичних спостережень Головного управління статистики у

2025 році забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення Закарпатської області склали 3,7 тис. тонн. З загальної кількості викидів, частка м. Ужгород складала 3,2% (120,6 т), у тому числі діоксид сірки 9,8 т та діоксид азоту 8,8 т. (рис.1).

Для визначення ступеня забруднення атмосферного повітря за методикою що викладена вище ми скористувалися базою даних станції №1162 Eco-City.

Ця станція розташована біля корпусу хімічного факультету Ужгородського національного університету (вул. Підгірна 46). Станція проводить виміри: формальдегіду, аміаку, діоксид азоту, вуглецю оксид, твердих частинок (PM2.5, PM10) та метеопараметрів (температура, вологість, тиск).

Для станції №1162 ми обрали дані з січня по грудень 2023 року. У загальному ексель-таблиця складається з восьми колонок та 130 297 рядків даних. Показники виміру у таблиці подані у міжнародній системі вимірювання: формальдегід у ppb; аміак, діоксид азоту, вуглецю оксид – ppm; тверді частинки (PM2.5, PM10) – $\mu\text{g}/\text{m}^3$; температура – °C, вологість – %; тиск – Pa.

На основі проведених розрахунків визначено показники, що характеризують рівень забруднення атмосферного повітря окремими речовинами, а також обчислено комплексний індекс сумарного забруднення атмосфери.

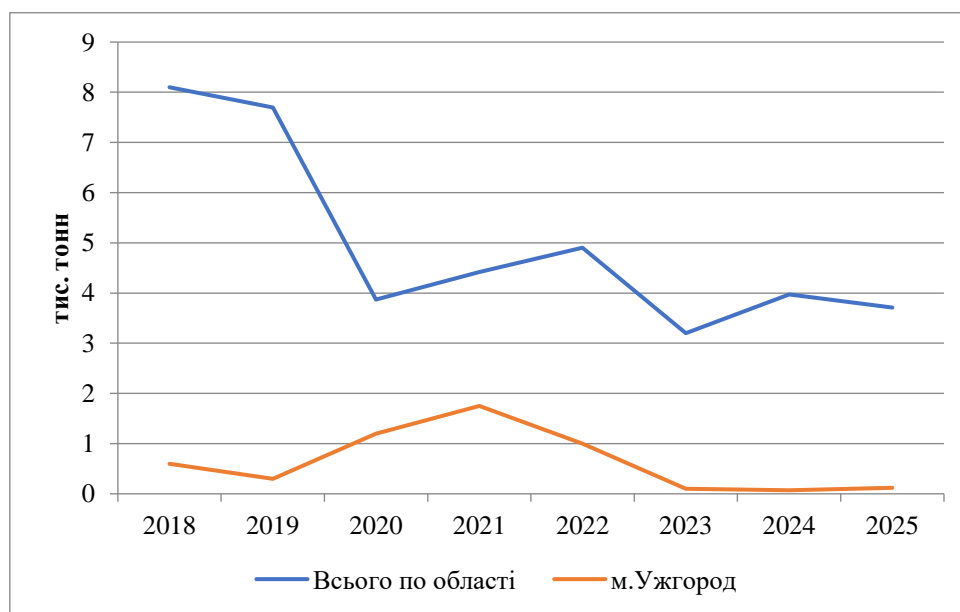


Рис. 1 – Динаміка викидів забруднюючих речовин

Fig. 1 – Dynamics of pollutant emissions

Для візуалізації отриманих значень побудовані графіки, які представляють динаміку добових значень індексу забруднення атмосфери (ІЗА) для ключових забруднюючих речовин за чотири контрольні місяці (січень, квітень, липень, жовтень). Кожен графік відображає рівень антропогенного та природного навантаження на повітряне середовище:

1) ІЗА формальдегіду – це один із найбільш критичних показників. На графіку видно, що значення ІЗА часто коливаються в межах 15-35 одиниць. Найбільш нестабільна ситуація спостерігається у липні (червона лінія) та січні (блакитна лінія). Зокрема, у січні зафіксовано різкий аномальний стрибок (пік) близько 20-го числа, що перевищив позначку 45. Це може бути пов'язано з температурними інверсіями, які перешкоджають розсіюванню газів (рис. 2а).

2) ІЗА діоксиду азоту – графік показує виражену сезонність. Найвищі рівні забруднення характерні для квітня (зелена лінія), де на початку місяця (4-5 числа) індекс сягає максимуму – понад 2,0. Липень та жовтень демонструють значно нижчі та стабільніші показники (в межах 0,1-0,3) (рис. 2б).

3) ІЗА аміаку – тут чільне місце посідає липень (червона лінія). Протягом усього місяця спостерігаються високі показники з піком 13-го числа (понад 0,0020). Це часто пояснюється активізацією процесів гниття органіки та промисловими викидами в умовах високих температур (рис. 2в).

4) ІЗА оксиду вуглецю – оксид вуглецю має меншу амплітуду коливань. Найвищі середні значення зафіксовані у січні (0,04–0,07) та жовтні (0,04–0,05). Це корелює з роботою автотранспорту та систем опалення. Найнижчий рівень зафіксовано у квітні (рис. 2г).

5) ІЗА твердими частинками (PM_{2.5} та PM₁₀) – ці графіки є найбільш показовими щодо якості повітря в розрізі опалювального сезону: (рис. 3). Січень (блакитна лінія) – демонструє екстремальні піки для обох типів пилу. Для PM_{2.5} індекс піднімається вище 3,0, а для PM₁₀ – майже до 1,0. Основні сплески припадають на 3-тє, 12-тє та 30-тє числа. Інші місяці – показники для квітня, липня та жовтня залишаються стабільно низькими (майже на нульовому рівні порівняно з січнем), що підтверджує вплив спалювання твердого палива та специфічних метеоумов взимку.

Завершальний графік інтегрує всі вищезгадані домішки в єдиний середньодобовий показник – комплексний індекс забруднення атмосферного повітря – КІЗА_{сд} (рис. 4).

Загальний тренд графіку характеризується постійним високим рівнем забруднення, оскільки значення КІЗА майже ніколи не опускаються нижче 10. Найбільш забрудненим місяцем за сукупністю факторів виступає липень (червона лінія) з частими піками понад 30, та січень (блакитна лінія), де спостерігається найвищий разовий пік року – близько 45 одиниць.

Аналіз свідчить про те, що основними проблемами є формальдегід (протягом усього року) та дрібнодисперсний пил (у зимовий період). Високі значення КІЗА (понад 14 вважається «дуже високим» рівнем) вказують на значне екологічне навантаження на регіон, де проводилися вимірювання.

Підвищені концентрації формальдегіду можуть бути пов'язані як із транспортними викидами, так і з локальними джерелами антропогенного походження, що потребує додаткових досліджень.

Розрахунок гарантованої якості атмосферного повітря проводився на основі даних про фактичні концентрації та ГДК_{сд} за формулами ймовірності неперевикнення нормативів.

1. Вихідні дані та ГДК (розрахунок проведений без врахування даних PM₁₀ і PM_{2.5} так як для них ГДК_{сд} не встановлено):

– період спостережень: січень (31 день), квітень (30 днів), липень (31 день), жовтень (31 день) 2023 року. Загальна кількість днів спостережень (m) 123 дні.

– ГДК_{сд}: формальдегід 0,003 мг/м³; аміак 0,04 мг/м³; діоксид азоту 0,04 мг/м³; вуглецю оксид 3,0 мг/м³.

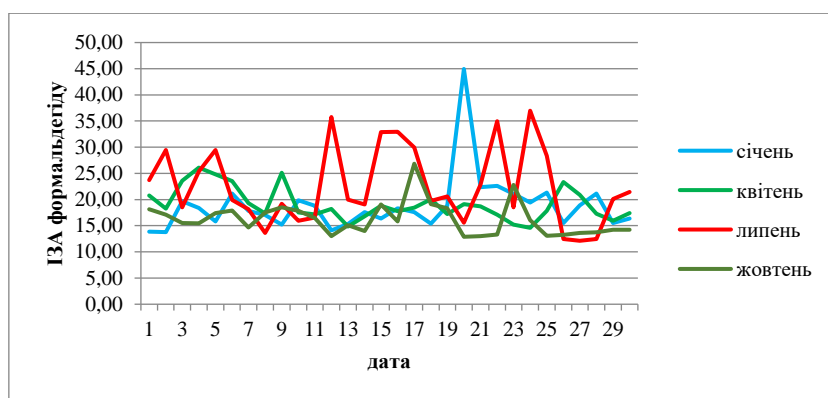
2. Розрахунок ймовірностей неперевикнення ГДК для кожної речовини.

Ми використовуємо формулу ймовірності для кожної речовини ($P_{сдj}$):

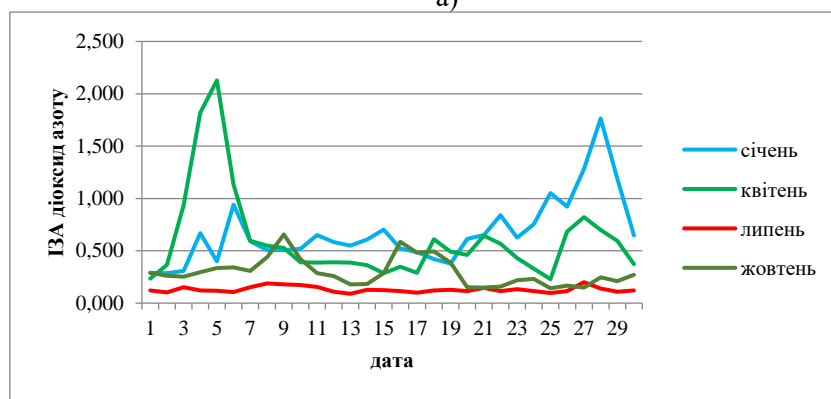
$$P_{сдj} = \frac{m_{сдj}}{m}, \quad (3)$$

де $m_{сдj}$ – кількість днів, коли концентрація j -тої речовини \leq ГДК_{сд}.

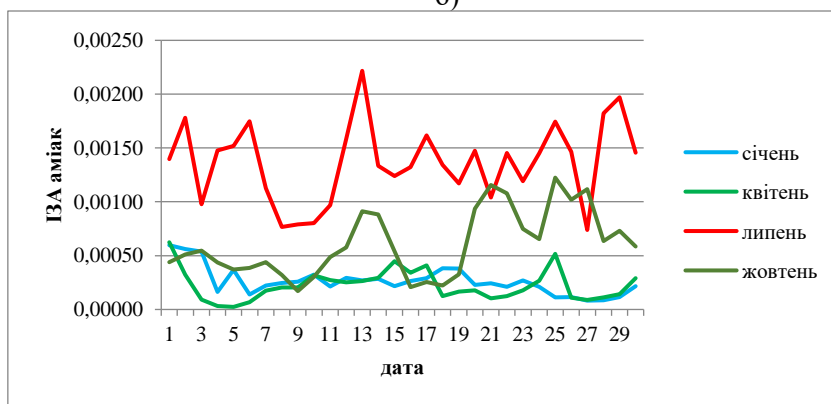
Концентрації забруднюючих речовин розглядалися як випадкові величини, для яких визначалися середні значення та варіабельність. Імовірність неперевикнення нормативів оцінювалася за емпіричними частотами спостережень. Отримані результати інтерпрету-



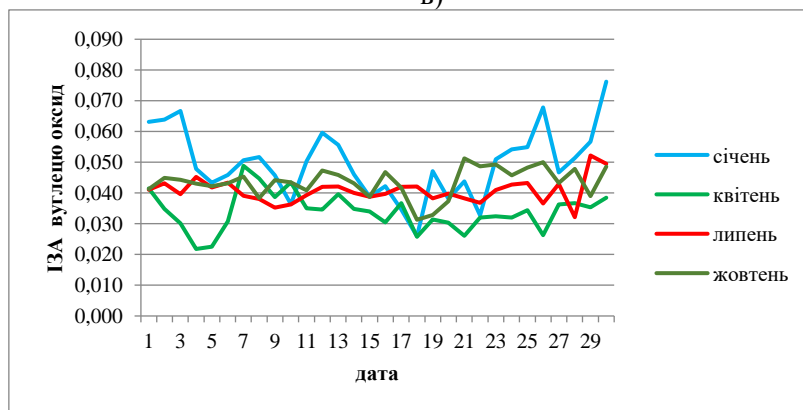
а)



б)

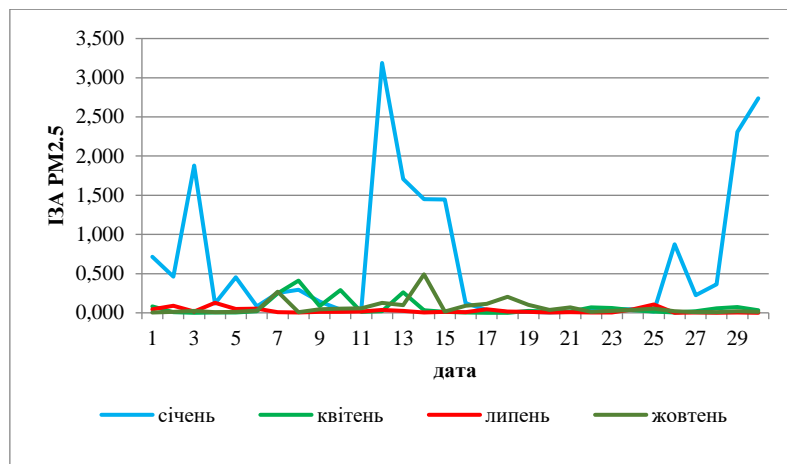


в)

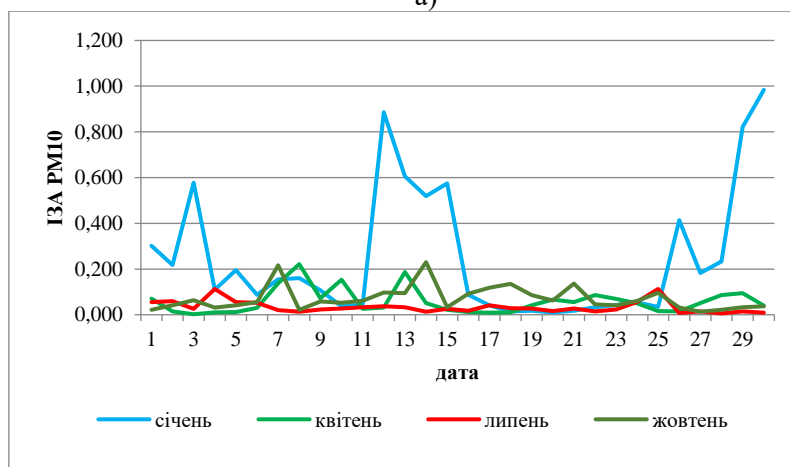


г)

Рис. 2 – Динаміка ІЗА формальдегіду (а), діоксиду азоту (б), аміаку (в), оксиду вуглецю (г)
Fig. 2 – Dynamics of ISA of formaldehyde (a), nitrogen dioxide (b), ammonia (c), carbon monoxide (d)



а)



б)

Рис. 3 – Динаміка ІЗА твердими частинками: а – PM2.5 та б – PM10
Fig. 3 – Dynamics of ISA by solid particles: a – PM2.5 and b – PM10

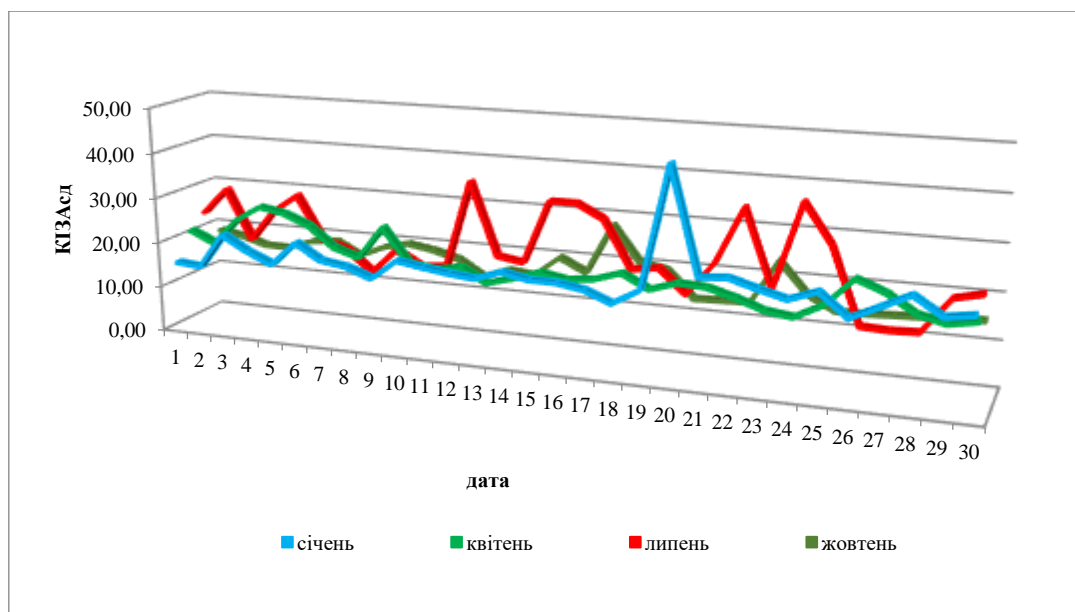


Рис. 4 – Динаміка комплексного індексу забруднення атмосферного повітря
Fig. 4 – Dynamics of the complex index of atmospheric air pollution

валися як статистичні оцінки гарантованої якості атмосферного повітря.

Після проведення розрахунків отримаємо наступні значення:

– формальдегід: концентрації коливаються від $\sim 0,0104$ мг/м³ до $\sim 0,0201$ мг/м³. Всі виміряні значення перевищують ГДКсд 0,003 мг/м³.

$$m_{с \text{ формальдегід}}=0;$$
$$P_{сд \text{ формальдегід}}=0/123=0.$$

– аміак: концентрації коливаються від $\sim 0,0028$ мг/м³ до $\sim 0,0087$ мг/м³. Всі виміряні значення нижчі за ГДКсд 0,04 мг/м³.

$$m_{с \text{ аміак}}=123;$$
$$P_{сд \text{ аміак}}=123/123=1.$$

– діоксид азоту: концентрації коливаються від $\sim 0,0184$ мг/м³ до $\sim 0,0514$ мг/м³. Значення часто перевищують ГДКсд 0,04 мг/м³ (наприклад, 4, 5 квітня, 25, 27, 29, 30 січня).

$$m_{с \text{ діоксид азоту}} < 123;$$
$$P_{сд \text{ діоксид азоту}} < 1.$$

– вуглецю оксид: концентрації коливаються від $\sim 1,15$ мг/м³ до $\sim 1,57$ мг/м³. Всі виміряні значення нижчі за ГДКсд 3,0 мг/м³.

$$m_{с \text{ вуглецю оксид}}=123;$$
$$P_{сд \text{ вуглецю оксид}}=123/123=1.$$

Розрахунок комплексної гарантованої якості повітря – комплексна ймовірність неперевикнення ($P_{сд}$) визначається як частка днів, коли всі речовини одночасно не перевищували своїх ГДКсд.

Оскільки ми маємо нульову ймовірність для формальдегіду ($P_{сд \text{ формальдегід}}=0$) та ненульову кількість перевищень для діоксиду азоту, кількість днів, коли всі чотири речовини одночасно були в межах норми ($m_{с}$), дорівнює нулю.

Якщо провести аналогічний розрахунок, коли значення формальдегіду були б меншими за середньодобове ГДК тоді б ми отримали наступні значення – гарантована якість атмосферного повітря (без урахування формальдегіду) становила б 0,943 (або 94,3%). Це свідчить про те, що з ймовірністю 94,3 % стан атмосферного повітря відповідав би встановленим санітарно-гігієнічним нормативам. Водночас навіть за таких умов основним чинником, що знижує гарантовану якість атмосферного повітря, залишався б діоксид азоту, перевищення концентрацій якого найчастіше фіксувалися у зимовий та весняний періоди.

Отримані значення ймовірностей свідчать про статистично стійкий характер перевищення нормативних значень для формальдегіду протягом усього періоду спостережень. Для аміаку та оксиду вуглецю ймовірність неперевикнення гранично допустимих концентрацій наближалася до одиниці, що вказує на стабільне дотримання нормативних вимог. Для діоксиду азоту встановлено періодичні перевищення ГДК, які спричиняли зниження показника гарантованої якості атмосферного повітря переважно у зимовий та весняний періоди.

Висновки

Кліматичні та орографічні особливості м. Ужгород створюють несприятливі умови для розсіювання забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери. Значна повторюваність малих швидкостей вітру та тривалі періоди штилю сприяють накопиченню домішок у повітряному середовищі й посиленню антропогенного навантаження. Основними джерелами забруднення атмосферного повітря міста є пересувні джерела викидів, насамперед автомобільний транспорт, тоді як внесок стаціонарних джерел у загальному обсязі викидів області залишається порівняно невисоким.

Аналіз результатів громадського моніторингу атмосферного повітря (станція №1162) за 2023 рік виявив чітко виражену сезонну диференціацію рівнів забруднення. Найбільш критичні концентрації формальдегіду спостерігалися протягом усього року з максимальними значеннями у зимовий та літній періоди. Для

дрібнодисперсних частинок PM_{2.5} і PM₁₀ характерним було зростання концентрацій у холодний період року, що пов'язано з опалювальним сезоном та несприятливими умовами розсіювання. Підвищені концентрації діоксиду азоту фіксувалися переважно навесні та корелювали з інтенсивністю транспортного навантаження.

Результати розрахунку індексу забруднення атмосфери (ІЗА) показали, що формальдегід є визначальним чинником формування високого рівня забруднення повітряного середовища. Комплексний індекс забруднення атмосферного повітря у більшості випадків перевищував рівень, який характеризується як «дуже високий», а максимальні значення були зафіксовані у січні та липні, що свідчить про суттєве екологічне навантаження на територію дослідження.

Оцінювання гарантованої якості атмосферного повітря із застосуванням ймовірнісного

підходу підтвердило критичну ситуацію щодо формальдегіду, для якого протягом усього періоду спостережень реєструвалися перевищення нормативних значень. Водночас концентрації аміаку та оксиду вуглецю переважно відповідали встановленим нормативам, тоді як для діоксиду азоту періодично фіксувалися перевищення у зимово-весняний період.

Отримані результати свідчать про необхідність удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря, посилення контролю за транспортними та локальними джерелами

викидів, а також впровадження природоохоронних заходів, спрямованих на зниження концентрацій формальдегіду, оксидів азоту та дрібнодисперсних частинок у міському середовищі. Особливої уваги потребує дослідження потенційних локальних джерел формальдегіду в районі розташування станції спостереження.

Запропонований підхід може бути використаний для оперативного статистичного оцінювання якості атмосферного повітря на основі даних автоматизованих систем громадського моніторингу.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Внесок авторів: автори зробили рівний внесок у цю роботу.

Декларація про використання ШІ

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту

Список використаної літератури

1. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. 2021. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228?utm_source=chatgpt.com
2. Баштаннік, М. П., Жемера, Н. С., Кіптенко, Є. М., & Козленко, Т. В. Стан забруднення атмосферного повітря над територією України. *Наукові праці УкрНДГМІ*, 2024. Вип. 266, С. 70–93. URL: https://old.uhmi.org.ua/pub/np/266/Bashtannik_Zhemera_Kiptenko_Kozlenko_266.pdf
3. *Реформа моніторингу та управління якістю повітря*. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. 2019. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/reformy/kompleksnyj-monitoryng-dovkillya/>
4. Adamenko, S. Y., Arkhypova, L. M., Adamenko, Y. O., Moskaliuk, N. M., Hlibovytska, N. I., & Chupa, V. M. Patterns of PM₁₀ particles change in the atmospheric air of Ivano-Frankivsk city. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024. Vol. 1415. No 1. 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012002>
5. Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. Air pollution and mortality in the Medicare population. *New England Journal of Medicine*. 2020. Vol. 376. No 26. P.2513–2522. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747>
6. *Global Burden of Disease Study (GBD): Air pollution*. 2024. University of Washington. https://www.healthdata.org/research-analysis/health-topics/air-pollution?utm_source=chatgpt.com
7. Brauer, M., et al. Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2021. *The Lancet*. 2024. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)00933-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00933-4)
8. Wu, Y., Wang, M., Lu, K., Zhang, Y., & Zhang, Y. Production and loss of atmospheric formaldehyde at a suburban site in northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023. Vol. 23. P. 2997–3015. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2997-2023>
9. Liu, S.-Q., Ma, H.-N., Tang, M.-X., Shao, Y.-M., Yao, T.-T., He, L.-Y., & Huang, X.-F. Decoding the primacy of transportation emissions of formaldehyde pollution in an urban atmosphere. *Toxics*, 2025. Vol.13. No 8. P. 643. <https://doi.org/10.3390/toxics13080643>
10. Manzueta, R., Kumar, P., Ariño, A. H., & Martín-Gómez, C. Strategies to reduce air pollution emissions from urban residential buildings. *Science of the Total Environment*, 2024. Vol. 947. 175809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175809>
11. *Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року* (Закон України № 2697-VIII). 2019. Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
12. *Про охорону атмосферного повітря* (Закон України № 2707-XII). Законодавство України. 1992 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>

13. Arkhyrova, L. M., Adamenko, S. Y., Adamenko, Y. O., Kachala, T. B., & Kachala, S. V. Modeling the dependence of ambient air pollution on meteorological factors: A case study from Ukraine. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025. Vol. 3153. No 1., 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3153/1/012021>
14. Bernacki J., Scherer R. (2025). A Comprehensive Review of Data-Driven Techniques for Air Pollution Concentration Forecasting. *Sensors (Basel)*, 25(19),6044. <https://doi.org/10.3390/s25196044>
15. Кольцов, М., Шевченко, Л. Моніторинг якості атмосферного повітря: український та міжнародний досвід: аналітична записка. ГО «Фундація «Відкрите Суспільство». 2020. URL: https://osf.org.ua/data/blog_dwnl/Analitichna_zapiska_atmosferne_povitrya.pdf
16. Сорока, М. Л. (Ред.). *Radiation and Smog Alarm. Настанови та принципи оповіщення населення про якість повітря, радіаційну та хімічну небезпеку*. 2022. Арніка. <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/cleanair.org.ua-uaqi-radiation-and-smog-alarm-presentation-soroka.pdf>
17. Klymchuk, I., Arkhyrova, L. Research on climate change in the Carpathian Region: Consequences and challenges for ski resorts. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2023. Vol. 14. No 1. P. 66–74. <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2023.19>
18. Матвійчук, В. К., Чугаєнко, Ю. О., Савєнков, О. І. Екологічна політика в системі державного управління національним господарством. Національна академія управління. 2023. URL: <https://nam.kyiv.ua/files/publications/978-966-8406-83-6-monog.pdf>
19. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря (Постанова № 827). Законодавство України. (2019). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>
20. Некос, А. Н., Кравченко, О. К. Оцінка стану та динаміки забруднення атмосферного повітря малих міст Харківської області. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 2012. №1-2. С.122–127. URL: <http://ludovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/19-12-17.pdf>
21. Фалько В.В. Оцінка гарантованої якості атмосферного повітря для рослин на прикладі парку ім. Т. Г. Шевченка, м. Дніпро. *Екологічні науки* № 6(45). С. 153-157. URL: <https://eco.j.dea.kiev.ua/archives/2022/6/24.pdf>
22. Рибалова, О. В., Белан, С. В., Артем'єв, С. Р. Визначення екологічного ризику погіршення стану атмосферного повітря з урахуванням хімічної небезпеки регіонів України. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 2023. 18, С.196–209. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2013_18_25

Стаття надійшла до редакції 16.04.2026
Стаття рекомендована до друку 21.05.2026

Переглянуто 18.05.2026
Опубліковано 30.05.2026

S. Y. ADAMENKO¹,

PhD Student of the Department of Ecology

e-mail: stanislav.adamenko-a101-23@nung.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1678-0036>

L. M. ARKHYROVA¹, DSc (Technical),

Professor of the Department of Ecology

e-mail: konsevich@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8725-6943>

¹*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,*
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY CONSIDERING THE STOCHASTIC NATURE OF POLLUTANT CONCENTRATIONS

Purpose. Analysis of the state of atmospheric air, determination of the main factors of pollution formation and substantiation of the methodology for assessing guaranteed air quality, taking into account the random nature of pollutant concentrations.

Methods. Statistical and calculation of the integrated atmospheric pollution index (API).

Results. The research was conducted based on data from the Eco-City public monitoring station No. 1162 in the area of the Faculty of Chemistry of Uzhhorod National University, taking into account the climatic and orographic features of the territory. It was established that the main source of atmospheric air pollution is motor vehicles. A pronounced seasonality of changes in pollutant concentrations was revealed. Formaldehyde was

determined to be the main factor in exceeding the air pollution indices, while the KIZA values often corresponded to the level of “very high” pollution. The most critical indicators were recorded: for formaldehyde – throughout the year with maximum values in January and July; for fine dust PM_{2.5} and PM₁₀ – in the winter period due to the influence of the heating season and unfavorable dispersion conditions; for nitrogen dioxide – in April, which is associated with transport load. The assessment of atmospheric air quality showed a systematic exceedance of the standards for formaldehyde throughout the year.

Conclusions. The results of the study indicate a tense environmental state of the atmospheric air in the study area and the need to strengthen control over pollutant emissions. Priority measures include optimizing transport flows, reducing emissions during the heating season, and improving local atmospheric air monitoring systems, especially regarding the control of formaldehyde sources.

KEYWORDS: *ambient air, atmospheric pollution index, pollutants, element concentrations, guaranteed quality*

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the authors have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: authors have contributed equally to this work.

AI Statement

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. (2021). World Health Organization. Retrieved from https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228?utm_source=chatgpt.com
2. Bashtannik, M. P., Zhemera, N. S., Kiptenko, Ye. M., & Kozlenko, T. V. (2024). State of atmospheric air pollution over the territory of Ukraine. *Scientific Works of UkrSRIHM*, 266, 70–93. Retrieved from https://old.uhmi.org.ua/pub/np/266/Bashtannik_Zhemera_Kiptenko_Kozlenko_266.pdf
3. *Reform of air quality monitoring and management.* (2019). Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/diyalnist/reformy/kompleksnyj-monitoryng-dov-killya/>
4. Adamenko, S. Y., Arkhypova, L. M., Adamenko, Y. O., Moskaliuk, N. M., Hlibovytska, N. I., & Chupa, V. M. (2024). Patterns of PM₁₀ particles change in the atmospheric air of Ivano-Frankivsk city. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012002>
5. Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. (2020). Air pollution and mortality in the Medicare population. *New England Journal of Medicine*, 376(26), 2513–2522. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747>
6. *Global Burden of Disease Study (GBD): Air pollution.* University of Washington. (2024). Institute for Health Metrics and Evaluation. Retrieved from https://www.healthdata.org/research-analysis/health-topics/air-pollution?utm_source=chatgpt.com
7. Brauer, M., et al. (2024). Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2021. *The Lancet*. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)00933-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00933-4)
8. Wu, Y., Wang, M., Lu, K., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2023). Production and loss of atmospheric formaldehyde at a suburban site in northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 2997–3015. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2997-2023>
9. Liu, S.-Q., Ma, H.-N., Tang, M.-X., Shao, Y.-M., Yao, T.-T., He, L.-Y., & Huang, X.-F. (2025). Decoding the primacy of transportation emissions of formaldehyde pollution in an urban atmosphere. *Toxics*, 13(8), 643. <https://doi.org/10.3390/toxics13080643>
10. Manzueta, R., Kumar, P., Ariño, A. H., & Martín-Gómez, C. (2024). Strategies to reduce air pollution emissions from urban residential buildings. *Science of the Total Environment*, 947, 175809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175809>
11. *On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the Period up to 2030* (Law of Ukraine No. 2697-VIII). (2019). Verkhovna Rada of Ukraine.
12. *On Atmospheric Air Protection* (Law of Ukraine No. 2707-XII). (1992). Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>

13. Arkhypova, L. M., Adamenko, S. Y., Adamenko, Y. O., Kachala, T. B., & Kachala, S. V. (2025). Modeling the dependence of ambient air pollution on meteorological factors: A case study from Ukraine. *Journal of Physics: Conference Series*, 3153(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3153/1/012021>
14. Bernacki J., Scherer R. (2025). A Comprehensive Review of Data-Driven Techniques for Air Pollution Concentration Forecasting. *Sensors (Basel)*, 25(19),6044. <https://doi.org/10.3390/s25196044>
15. Koltsov, M., & Shevchenko, L. (2020). *Air quality monitoring: Ukrainian and international experience: Analytical report*. Open Society Foundation. Retrieved from https://osf.org.ua/data/blog_dwnl/Analitichna_zapiska_atmosferne_povitrya.pdf
16. Soroka, M. L. (Ed.). (2022). *Radiation and Smog Alarm: Guidelines and principles for informing the public about air quality, radiation, and chemical hazards*. Arnika. Retrieved from <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/cleanair.org.ua-uaqi-radiation-and-smog-alarm-presentation-soroka.pdf>
17. Klymchuk, I., & Arkhypova, L. (2023). Research on climate change in the Carpathian Region: Consequences and challenges for ski resorts. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 14(1), 66–74. <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2023.19>
18. Matviichuk, V. K., Chuhaenko, Yu. O., & Savenkov, O. I. (2023). *Environmental policy in the system of public administration of the national economy*. National Academy of Management. Retrieved from <https://nam.kyiv.ua/files/publications/978-966-8406-83-6-monog.pdf>
19. *Some issues of state monitoring in the field of atmospheric air protection* (Resolution No. 827). (2019). Cabinet of Ministers of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>
20. Nekos, A. N., & Kravchenko, O. K. (2012). Assessment of the state and dynamics of atmospheric air pollution in small towns of Kharkiv region. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (1-2), 122–127. Retrieved from <http://luddovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/19-12-17.pdf>
21. Falko V. Assessment of guaranteed air quality for plants (case of the park named after T. Shevchenko in Dnipro). *Environmental Sciences*, 6(45), 153-157. Retrieved from <https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2022/6/24.pdf>
22. Rybalova, O. V., Bielan, S. V., & Artemiev, S. R. (2023). Determination of the environmental risk of atmospheric air quality deterioration considering the chemical hazard of Ukrainian regions. *Problems of Emergency Situations*, 18, 196–209. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2013_18_25

The article was received by the editors 16.04.2026
The article is recommended for printing 21.05.2026

The article was revised 18.05.2026
This article published 30.05.2026