

# ТОКСИЧНИЙ ВПЛИВ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН НА ЗАХВОРЮВАНІСТЬ НАСЕЛЕННЯ ВІННИЧЧИНИ

Вінницький національний технічний університет

У статті розглянуто статистичні дані забруднення атмосферного повітря Вінницької області за 2023-2025 роки. Проаналізовані викиди в атмосферне повітря за видами економічної діяльності, основні забруднювачі та рівні забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Зафіксовані перевищення ГДК забруднюючих речовин та їх токсичний вплив за результатами виконання плану моніторингових досліджень якості атмосферного повітря у 2025 році. Проаналізовано обласні показники структури загальної захворюваності населення за 2023-2025 роки. Виявлено динаміку збільшення показників захворюваності, зокрема легневих захворювань, захворювань систем кровообігу, які негативно впливають на репродуктивне здоров'я населення.

**Ключові слова:** забруднення атмосферного повітря, викиди забруднюючих речовин, нозологічні захворювання, легеневі захворювання, захворювання систем кровообігу.

Стаття надійшла до редакції / Received 02.03.2026  
Прийнята до друку / Accepted 21.04.2026  
Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Васильківський І.В., Зелінський Д.В.

## Вступ

Сучасна парадигма охорони здоров'я розглядає якість навколишнього середовища не просто як фоновий аспект життєдіяльності, а як провідний детермінант загальнонаціональної захворюваності та смертності. За матеріалами Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), середовище перебування здатне формувати від 30% і більше сукупного ризику розвитку хронічних неінфекційних захворювань. Атмосферне повітря виступає найважливішим компонентом біосфери, безперервний контакт із яким визначає найвищий рівень експозиції токсичних речовин для живих організмів. Незважаючи на глобальні ініціативи щодо зниження антропогенного навантаження, забруднення атмосфери продовжує бути домінуючим фактором ризику, що призводить до системного отруєння населення, деградації репродуктивного здоров'я, інвалідизації та передчасної смертності. Останніми роками Україна фіксує критичні показники, посідаючи провідні місця у світовому рейтингу за рівнем смертності на душу населення, що безпосередньо спричинена незадовільною якістю атмосферного повітря.

Оскільки виробнича діяльність викликає погіршення природного атмосферного середовища, суспільство зобов'язане взяти на себе турботу щодо відновлення його властивостей та охорони від подальшої деградації.

## Постановка проблеми

Вплив атмосферних поллютантів на організм людини реалізується через складні патофізіологічні каскади. Найпоширеніші забруднювачі, такі як дрібнодисперсні суспендовані частинки (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), діоксид сірки (SO<sub>2</sub>), оксид вуглецю (CO) та формальдегід (H<sub>2</sub>CO), надходять переважно інгаляційним шляхом. Газоподібні сполуки та ультрадрібні аерозолі здатні долати аерогематичний бар'єр у легневих альвеолах, потрапляючи безпосередньо у системний кровотік. Систематична експозиція індукує розвиток оксидативного стресу, ендотеліальної дисфункції та системної запальної відповіді. Зокрема, встановлено, що дрібнодисперсні частинки стимулюють підвищене утворення тромбоцитів, що призводить до гіперкоагуляції та формування мікротромбів у судинному руслі. Ці процеси різко підвищують ймовірність виникнення ішемічної хвороби серця, інфаркту міокарда, цереброваскулярних катастроф (інсультів) та провокують порушення нормальної гемодинаміки з неконтрольованими коливаннями артеріального тиску.

Водночас локальна дія токсикантів на слизові оболонки респіраторного тракту викликає гіперреактивність бронхів, деструкцію миготливого епітелію та виснаження локальних імунних

механізмів, що клінічно маніфестує у вигляді бронхіальної астми, хронічного обструктивного захворювання легень (ХОЗЛ) та частих гострих респіраторних інфекцій нижніх дихальних шляхів. Окремі сполуки, ідентифіковані у промислових та транспортних викидах, володіють доведеною канцерогенною та мутагенною дією, значно підвищуючи ризик розвитку злоякісних новоутворень легень, шкіри та порушуючи нормальний ембріогенез у вагітних жінок. Існує значна кількість наукових досліджень, які досліджують кореляцію між рівнями забруднення довкілля і рівнем захворюваності [1-5]. Для трансформації розрізаних клінічних спостережень у надійну доказову базу необхідно застосовувати строгий статистичний аналіз зв'язку «концентрація забруднювача – нозологічна одиниця».

Історично оцінка таких ризиків стикалася з проблемою змішування (confounding), оскільки на частоту розвитку захворювань одночасно впливають метеорологічні умови (екстремальні температури, вологість), сезонні епідемічні цикли та соціально-поведінкові фактори [5]. Вирішення цієї проблеми лежить у площині застосування складних математичних алгоритмів аналізу часових рядів (time-series analysis), зокрема узагальнених лінійних моделей (GLM) та узагальнених адитивних моделей (GAM), які дозволяють ізолювати незалежний внесок конкретного поллютанта в загальну картину захворюваності, ефективно контролюючи інші коваріати шляхом використання згладжуючих сплайн-функцій [6].

### Основна частина

Будь-яке локальне епідеміологічне дослідження має спиратися на глобальні доказові стандарти. У 2021 році ВООЗ здійснила фундаментальний перегляд Глобальних керівних принципів щодо якості повітря (AQG), безпрецедентно знизивши рекомендовані середньорічні межі для  $PM_{2.5}$  з 10 до 5  $мкг/м^3$ , а для  $NO_2$  з 40 до 10  $мкг/м^3$ . Цей крок був продиктований накопиченням масиву даних щодо негативного впливу токсикантів навіть у концентраціях, які раніше вважалися безпечними [1]. Мета-аналізи когортних досліджень, проведені у період з 2023 по 2026 роки, з використанням протоколів PROSPERO та оцінкою ризику упередженості за допомогою критеріїв ОНАТ, повністю підтверджують валідність цих жорстких нормативів [7]. Наймасштабніші систематичні огляди останніх років переконливо доводять пряму кореляцію між експозицією до суспендованих частинок та зростанням смертності від серцево-судинних, респіраторних і онкологічних патологій. Мета-аналіз 88 когортних досліджень, опублікований у 2024 році, розрахував зведені відносні ризики (Relative Risk, RR) на кожні 10  $мкг/м^3$  приросту концентрації  $PM_{2.5}$  та зафіксував високу статистичну значущість (таблиця 1) для всіх досліджуваних нозологій [7]. Наступне оновлення бази даних ВООЗ, що охопило вже 106 досліджень, підтвердило ці висновки, надавши їм статусу «високого рівня достовірності» [8].

Таблиця 1

#### Нозологічні групи

Нозологічна група (причина смертності)	Відносний ризик (RR) на 10 $мкг/м^3$ $PM_{2.5}$	95% Довірчий інтервал (95% ДІ)
Усі причини (All-cause mortality)	1.080	1.068 – 1.092
Серцево-судинна система	1.058	1.055 – 1.062
Респіраторна система	1.066	1.034 – 1.097
Злоякісні новоутворення легень	1.118	1.076 – 1.159

Структурний аналіз хімічного складу частинок показав, що найвищу токсичність мають фракції чорного вуглецю (Black Carbon) та органічного вуглецю, тоді як довгострокова експозиція до нітрат-іонів і силікатів асоційована зі стійким підвищенням загальної кардіоваскулярної смертності [9]. Збільшення госпіталізацій через ішемічну хворобу серця, аритмії, інфаркти міокарда та хронічні обструктивні захворювання легень (ХОЗЛ) також має сильну кореляцію із підвищенням рівня  $PM_{2.5}$  [10].

Особлива увага в дослідженнях 2023-2025 років приділяється діоксиду азоту, який є класичним маркером забруднення, що генерується автомобільним транспортом і тепловими електростанціями. Тривалий час вплив  $NO_2$  недооцінювався через високий ступінь кореляції між  $NO_2$  та  $PM_{2.5}$  в атмосфері урбанізованих територій. Однак сучасні багатофакторні моделі (двополютантні моделі) ізолювали ефект діоксиду азоту. Мета-аналіз 56 досліджень показав, що приріст середньорічної концентрації  $NO_2$  на 10  $мкг/м^3$  збільшує ризик кардіоваскулярної смертності на 7% (RR = 1.07; 95% ДІ: 1.04–1.10) та загальної смертності на 3% (RR = 1.03; 95% ДІ: 1.02–1.05) [11].

Крім того, аналіз двофакторних регресійних моделей (за участю  $PM_{2.5}$  та  $NO_2$ ) демонструє, що додавання твердих частинок до математичної моделі лише мінімально (в межах 24.7-33.4%) знижує коефіцієнт впливу  $NO_2$ , що беззаперечно доводить самостійний, незалежний патофізіологічний механізм токсичної дії діоксиду азоту на серцево-судинну та респіраторну системи [12]. За розрахунками глобальної оцінки для країн з низьким та середнім рівнем доходу (LMICs), досягнення рекомендацій ВООЗ щодо зниження  $NO_2$  дозволило б уникнути близько 435 000 передчасних смертей щорічно, переважно від ішемічної хвороби серця та інсультів, що еквівалентно збереженню 1.9% ВВП цих держав [1]. Також виявлено кореляцію між впливом діоксиду азоту та виникненням генералізованих тривожних розладів, депресії та шизофренії, що відкриває новий напрямок у вивченні нейротоксичності поллютантів [13].

Формальдегід ідентифікований як системний токсикант, що уражає дихальні шляхи та слизові оболонки на місці первинного контакту (portal-of-entry effects) [14]. Дослідження з використанням алгоритмів машинного навчання (XGBoost з SHAP-аналізом) на базі масиву з понад 22500 спостережень виявили, що експозиція до формальдегіду є другим за силою предиктором скорочення тривалості життя, поступаючись виключно рівню освіти [15]. Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) у 2024 році завершило оновлення оцінки ризику для формальдегіду, підтвердивши його статус канцерогену та визначивши неканцерогенну референтну концентрацію (RfC) на надзвичайно низькому рівні — 0.007 мг/м<sup>3</sup> [16].

Популяційні дослідження, узагальнені в мета-аналізах 2025 року, підтверджують, що експозиція до формальдегіду спричиняє розвиток алергічного риніту, атопічного дерматиту та бронхіальної астми [17]. Зафіксовано відносний ризик виникнення астми у дітей на рівні  $RR = 1.20$  (95% ДІ: 1.11–1.31) та у дорослих —  $RR = 1.09$  (95% ДІ: 1.03–1.15) [18].

Для емпіричного підтвердження теоретичних моделей необхідно розглянути динаміку впливу поллютантів на конкретну популяцію. Аналітичний звіт Вінницької області за 2023–2025 роки слугує репрезентативним базисом для проведення статистичного аналізу зв'язку між концентрацією забруднювачів та рівнем захворюваності. До параметрів які вимірюються і характеризують техногенний вплив на навколишнє природне середовище належать обсяги викидів до атмосферного повітря із стаціонарних та пересувних джерел, обсяги скидів забруднених вод та вод без очищення і дані про утворення відходів [19].

За останніми опублікованими статистичними даними, у 2023 році у повітря Вінницької області від стаціонарних джерел потрапило 79,3 тис.т. забруднюючих речовин. Основні забруднювачі атмосферного повітря за звітний 2023 рік представлені у таблиці 2.

Таблиця 2

**Основні забруднювачі атмосферного повітря за 2023 рік [19]**

№ з/п	Підприємство-забруднювач	Викидів, т/рік	До загального обсягу викидів в області, %
	<b>Всі підприємства</b>	<b>79265,0</b>	<b>100,0</b>
1	Відокремлений підрозділ «Ладизинська тепла електрична станція» АТ «ДТЕК «Західенерго»	54674,1	69,0
2	Відокремлений підрозділ «Біогаз Ладизин» Товариства з обмеженою відповідальністю «Вінницька птахофабрика»	3222,1	4,1
3	Приватне акціонерне товариство «Продовольча компанія «Поділля»	2432,2	3,1
4	Філія «Птахокомплекс» Товариства з обмеженою відповідальністю «Вінницька птахофабрика»	2394,7	3,0
5	Товариство з обмеженою відповідальністю «Агрокомплекс «Зелена долина»	1389,1	1,8
6	Товариство з обмеженою відповідальністю «Продовольча компанія «Зоря Поділля»	1196,7	1,5
7	Інші підприємства	13956,1	17,5

Порівняно з 2022 роком кількість викидів збільшилась на 1,2 тис. т. [19]. Щільність викидів становила 2,94 тонни на квадратний кілометр, або 52 кг на кожного мешканця області. Домінантними поллютантами виступають сполуки вуглецю та сірки, які формують близько 80% сукупного обсягу викидів.

За даними ДУ «Вінницький обласний лабораторний центр МОЗ України» лише близько 7,2% проб повітря, відібраних в міських та сільських поселеннях, не відповідали вимогам за вмістом забруднюючих речовин за рахунок перевищення вмісту пилу, оксиду вуглецю, азоту діоксиду,

фенолу та його похідних, формальдегіду [19, 20]. Основними речовинами, що забруднюють атмосферне повітря населених пунктів є діоксид сірки (55,9%), речовини у вигляді твердих суспендованих частинок (14,6%), сполуки азоту (10,6%), метан (9,5%) та оксид вуглецю (6,7%).

Загальний рівень забруднення атмосферного повітря у Вінниці за комплексним індексом забруднення атмосфери (КІЗА) у 2024 році становив 8,12 і характеризувався, як високий. Порівняно з 2023 роком відмічалось не значне підвищення рівня забруднення атмосферного повітря (з 7,89 до 8,12). Разом з тим, у серпні та вересні спостерігалися найвищі індекси забруднення повітря – відповідно 9,6 та 10,6, зокрема через значно підвищену концентрацію формальдегіду (відповідно 3,5ГДКс.д. та 3,8ГДКс.д.) та діоксиду азоту (відповідно 1,6ГДКс.д. та 2ГДКс.д.) (рисунки 1,2,3) [11].

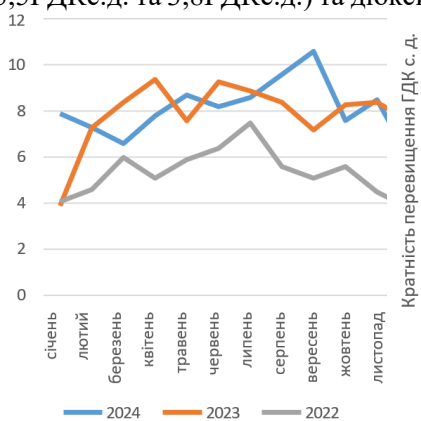


Рисунок 1 – Порівняння комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА) у 2022-2024 роках

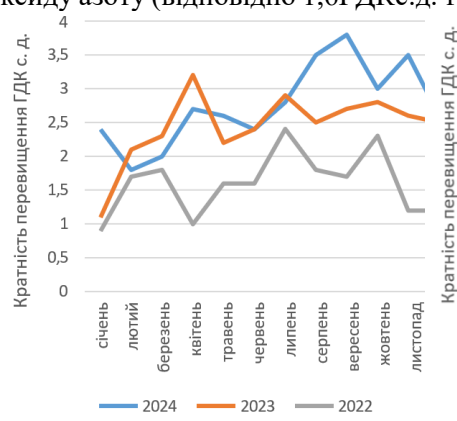


Рисунок 2 – Середньомісячні концентрації формальдегіду в кратності до ГДК с. д. у 2022-2024 роках

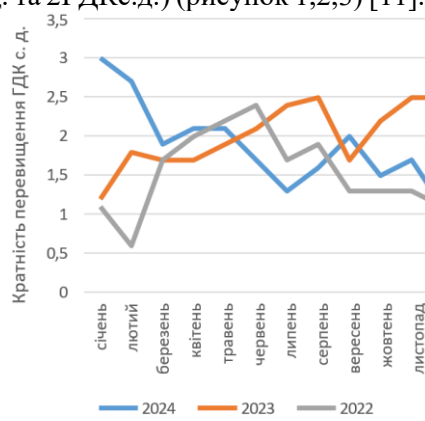


Рисунок 3 – Середньомісячні концентрації діоксиду азоту в кратності до ГДК с. д. у 2022-2024 роках

Протягом 2024 року у межах міста Вінниця фахівцями ДУ «Вінницький обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України» згідно Плану моніторингових досліджень відібрано та лабораторно досліджено 126 проб атмосферного повітря на вміст оксиду вуглецю, сірчистого ангідриду, азоту діоксиду та недиференційованого за складом пилу. Проби відбирались в зоні впливу автомагістралей, в межах житлової забудови міста, зонах відпочинку та на межі санітарно-захисних зон промислових підприємств. За результатами лабораторних досліджень перевищення гранично-допустимих концентрацій зареєстровано в 22 пробах (у 13-ох точках) по пилу та діоксиду азоту.

Загальний рівень забруднення атмосферного повітря у Вінниці за усередненим по двох ПЗС. КІЗА у 2025 році становив 5,4 і характеризувався, як підвищений. Порівняно з 2024 роком відмічалось значне зниження рівня забруднення атмосферного повітря (з 8,12 до 5,4). Разом з тим, КІЗА на пості №1 практично завжди характеризувався як високий, іноді – підвищений, тоді як на посту №2 – завжди був низьким (середньорічні значення відповідно 7,06 та 3,74).

У серпні та вересні спостерігалися найвищі індекси забруднення повітря на пості №1 (відповідно 9,2 та 9,8) зокрема через значно підвищену концентрацію формальдегіду (відповідно 2,8ГДКс.д. та 2,9ГДКс.д.) та діоксиду азоту (відповідно 2,5ГДКс.д. та 3,2ГДКс.д.) (рисунки 4, 5, 6).

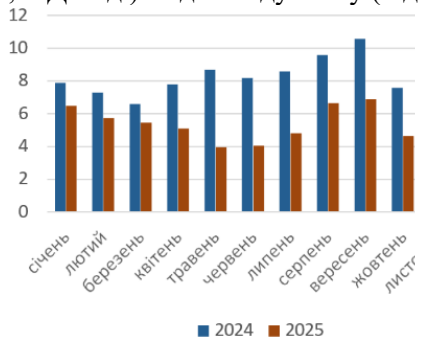


Рисунок 4 – Порівняння комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА) у 2024-2025 роках

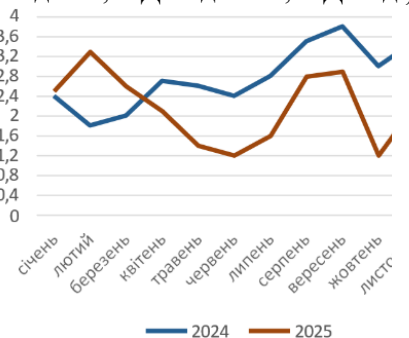


Рисунок 5 – Середньомісячні концентрації формальдегіду в кратності до ГДК с. д. у 2024-2025 роках

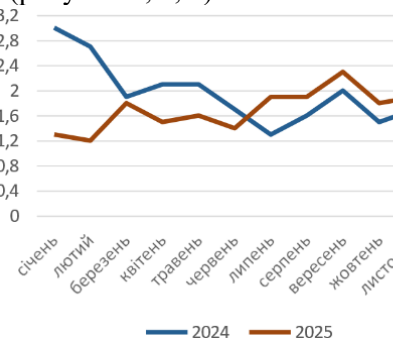


Рисунок 6 – Середньомісячні концентрації діоксиду азоту в кратності до ГДК с. д. у 2024-2025 роках

Протягом 2025 року у межах Вінниці фахівцями ДУ «Вінницький обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України» згідно з Планом моніторингових досліджень відібрано та лабораторно досліджено 186 проб атмосферного повітря на вміст оксиду вуглецю, сірчистого ангідриду, азоту діоксиду та недиференційованого за складом пилу. Проби відбирались в зоні впливу автомагістралей, в межах житлової забудови міста, зонах відпочинку та на межі санітарно-захисних зон промислових підприємств.

Моніторингові дослідження, розширені у 2025 році (186 проб у житловій забудові та на перехрестях), регулярно фіксували перевищення санітарних нормативів (таблиця 3).

Таблиця 3

**Зафіксовані перевищення ГДК забруднюючих речовин за результатами виконання Плану моніторингових досліджень якості атмосферного повітря у 2025 році [13]**

№	Місцезнаходження точки відбору зразків повітря	Дата відбору зразків повітря	Забруднююча речовина	Кратність перевищення ГДК
Житлова забудова в зоні впливу автомагістралей				
1	Перехрестя вулиць Гетьмана Мазепи – Немирівське шосе	15.04.2025	діоксид азоту	1,05
			недиференційований за складом пил (аерозоль)	1,08
			оксид вуглецю	1,14
2	Перехрестя вулиць Київська – Стрілецька	15.04.2025	діоксид азоту	1,15
			недиференційований за складом пил (аерозоль)	1,2
			оксид вуглецю	1,18
			формальдегід	1,06
		22.09.2025	діоксид азоту	1,05
3	Перехрестя вулиці Келецька – проспекту Космонавтів	15.04.2025	діоксид азоту	1,05
			недиференційований за складом пил (аерозоль)	1,22
			оксид вуглецю	1,04
4	Перехрестя вулиць Данила Нечая – Костя Широцького	15.04.2025	діоксид азоту	1,15
			недиференційований за складом пил (аерозоль)	1,2
			оксид вуглецю	1,18
			формальдегід	1,06
5	Зупинка «Електромережа» (вул. Пирогова)	15.04.2025	діоксид азоту	1,2
			недиференційований за складом пил (аерозоль)	1,2
			оксид вуглецю	1,02
			формальдегід	1,09
		22.09.2025	діоксид азоту	1,05
6	Західний автовокзал (вул. Барське шосе)	15.04.2025	діоксид азоту	1,1
			недиференційований за складом пил (аерозоль)	1,08
			оксид вуглецю	1,14
7	Площа Перемоги	15.04.2025	діоксид азоту	1,1
			недиференційований за складом пил (аерозоль)	1,14
			оксид вуглецю	1,1
		22.09.2025	недиференційований за складом пил (аерозоль)	1,02

Ці мікроекспозиції в зонах активної життєдіяльності людини (біля доріг) здатні провокувати системні запальні процеси та підвищене тромбоутворення, підвищуючи частоту розвитку деменції (на 12% частіше у жителів, що проживають ближче 50 метрів до автомагістралей) та серцевих відхилень.

Аналіз первинної та загальної захворюваності населення Вінниччини демонструє пряму кореляцію з погіршенням якості атмосферного повітря протягом 2023–2025 років.

У 2023 році загальна поширеність захворювань у популяції різко збільшилася на 24% (з 2353 до 5361 на 10 тис. населення). Найбільш вразливою когортою виявилися діти, де первинна захворюваність підскочила на 88% (до 7203 на 10 тис. дітей), та підлітки (+71%). Така чутливість дитячого організму пояснюється незрілістю детоксикаційних систем печінки та вищою частотою

дихання на кілограм маси тіла порівняно з дорослими, що забезпечує інтенсивніше поглинання поллютантів з повітря.

Тенденція продовжилася у 2024 році зі зростанням загальної захворюваності ще на 9%. У структурі нозологій стабільно домінують хвороби, патогенез яких тісно пов'язаний із забрудненням повітря: перше місце – хвороби системи кровообігу (29-30%), друге - хвороби органів дихання (15%).

До 2025 року кумулятивний ефект впливу токсикантів та стресових факторів призвів до вираженої ескалації гострих серцево-судинних катастроф:

1) рівень захворюваності на інфаркт міокарда збільшився на 11% порівняно з 2024 роком (з 13,8 до 15,4 випадків на 10 тис. населення).

2) зафіксовано підвищення смертності від інсульту серед осіб працездатного віку (з 6,0 до 8,0 на 10 тис.).

Динаміка захворюваності та смертності вінничан від інфаркту і інсульту представлена на рисунку 7.

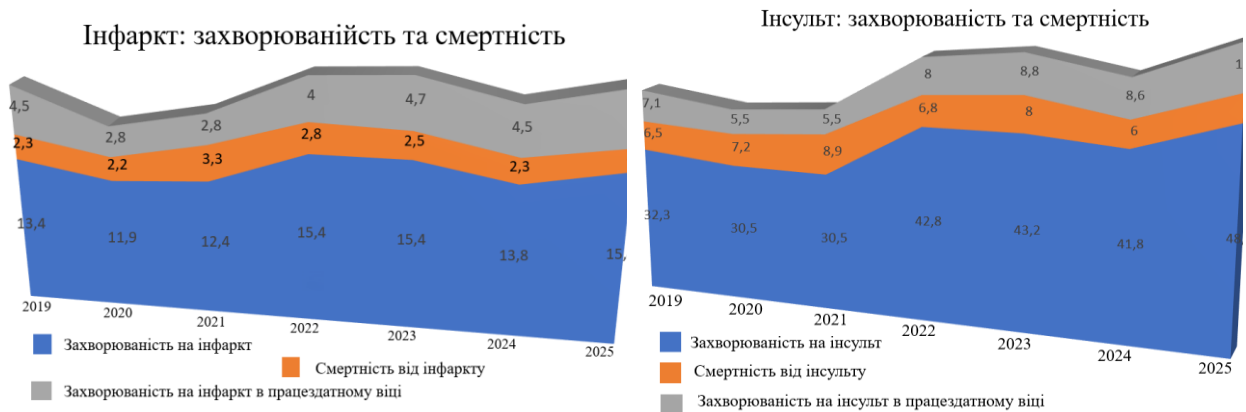


Рисунок 7 – Захворюваність та смертність вінничан від інфаркту і інсульту [21]

Цей епідеміологічний зріз абсолютно узгоджується з даними сучасних мета-аналізів [7], які прогнозують експоненціальне зростання серцево-судинних ускладнень у відповідь на зростання середньодобових концентрацій  $PM_{2,5}$  та  $NO_2$ .

Для виявлення достовірного, кількісно вираженого зв'язку між щоденними коливаннями концентрації забруднювача (наприклад,  $NO_2$ ) та кількістю звернень до медичних закладів або випадків смертності застосовується методологія аналізу часових рядів (Time-Series Analysis) [5].

Залежна змінна в епідеміологічних дослідженнях  $Y_t$  представляє собою дискретні події - підрахунок кількості госпіталізацій, смертей від інфаркту або нападів астми у конкретний день  $t$ . Ці дані (count data) мають специфічні властивості: вони завжди невід'ємні  $Y_t \geq 0$ , набувають лише цілих значень, а їхній розподіл зазвичай асиметричний із довгим правим хвостом. Використання класичного методу найменших квадратів (OLS) або звичайної множинної лінійної регресії в даному випадку є математично некоректним, оскільки лінійна модель може прогнозувати від'ємну кількість захворювань, а дисперсія похибок не є константою [6].

Фундаментальним підходом до моделювання дискретних даних є використання розподілу Пуассона в рамках теорії узагальнених лінійних моделей (Generalized Linear Models - GLM), розробленої Нелдером і Веддерберном [22].

Модель Пуассона припускає, що ймовірність виникнення у захворювань у день  $t$  описується формулою:

$$P(Y_t = y) = \frac{e^{-\mu_t} \cdot \mu_t^y}{y!} \quad (1)$$

де  $\mu_t$  – математичне сподівання кількості подій у день  $t$ , яке формується під впливом експозиції поллютантів та інших факторів.

Зв'язок між предикторами (концентрацією  $X_i$ ) та математичним сподіванням  $\mu_t$  задається через функцію зв'язку (link function), яка для розподілу Пуассона є логарифмічною:

$$\ln(\mu_t) = \alpha + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \dots \quad (2)$$

Це означає, що предиктори впливають на залежну змінну мультиплікативно, що відповідає біологічній логіці експоненціального зростання ризиків при накопиченні токсичного ефекту [23].

Критичним недоліком класичного розподілу Пуассона є жорстке обмеження: рівність математичного сподівання та дисперсії  $E(Y_t) = Var(Y_t) = \mu_t$ . У реальних клінічних та епідеміологічних даних захворюваність часто демонструє явища кластеризації (наприклад, раптові спалахи під час температурних інверсій або епідемії інфекційних хвороб). Це призводить до ситуації, коли реальна дисперсія значно перевищує математичне сподівання  $Var(Y_t) > \mu_t$ . Якщо ігнорувати цю надмірну дисперсію (overdispersion), стандартні похибки регресійних коефіцієнтів будуть штучно занижені, що призведе до хибно вузьких довірчих інтервалів та необґрунтовано оптимістичних Р-значень (високий ризик похибки першого роду) [24].

Для вирішення цієї проблеми застосовуються дві основні стратегії:

1) Квазі-Пуассонівська регресія (Quasi-Poisson GLM): вводиться додатковий параметр дисперсії  $\Phi$ , що дозволяє моделювати  $Var(Y_t) = \Phi \cdot \mu_t$ . Коефіцієнти регресії залишаються незмінними, але їхні стандартні похибки множаться на  $\sqrt{\Phi}$ , роблячи довірчі інтервали ширшими та реалістичнішими. Цей метод зазвичай базується на корекції Пірсона (Pearson chi-square scale) [25].

2) Від'ємна біноміальна регресія (Negative Binomial GLM): якщо дисперсія зростає швидше, ніж лінійно, використовується від'ємний біноміальний розподіл, який моделює дисперсію як квадратичну функцію:  $Var(Y_t) = \mu_t + \alpha \cdot \mu_t^2$ , де  $\alpha$  — параметр гетерогенності (або дисперсії). При  $\alpha \rightarrow 0$  модель зводиться до класичного Пуассона [24].

У сучасних дослідженнях впливу забруднення повітря на захворюваність (наприклад, поширення COVID-19 або серцево-судинних нападів) широко використовуються саме ці дві модифікації для забезпечення строгості статистичних висновків [26].

Оцінка впливу рівня забруднення (наприклад, концентрації  $NO_2$ ) на кількість інсультів неможлива без врахування широкого спектру зовнішніх факторів, які здатні одночасно змінювати як концентрацію поллютанта, так і рівень захворюваності. Такі змінні називаються конфаундерами (confounders) [5]. У популяційних дослідженнях часових рядів стандартні індивідуальні фактори ризику (вік, стать, генетика, куріння, ожиріння) не виступають конфаундерами, оскільки їх поширеність у популяції не змінюється з дня на день і не корелює із щоденними коливаннями забруднення [22]. Натомість критичними конфаундерами є метеорологічні умови та календарно-часові ефекти.

Температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск та сонячна радіація формують погодозалежну захворюваність. Аномальні температури (екстремальна спека або сильні морози) самостійно провокують звуження або розширення судин, що призводить до інфарктів та інсультів [27]. Паралельно температура визначає швидкості фотохімічних реакцій в атмосфері (зокрема, формування озону та вторинного  $PM_{2.5}$ ), а також інтенсивність розсіювання викидів (явища інверсії). Згідно з дослідженнями, локальні метеорологічні змінні є провідним рушійним фактором формування якості повітря [28].

Вплив температури на організм людини ніколи не є лінійним: він має U-подібну або V-подібну форму кривої, де ризики мінімальні за комфортних температур (близько 18-22°C) і різко зростають при відхиленні в обидва боки [27]. Спроба застосувати звичайну лінійну регресію  $Y \sim Temp$  призведе до катастрофічної похибки в розрахунках.

Для моделювання такої нелінійної поведінки застосовується апарат Узагальнених адитивних моделей (Generalized Additive Models - GAM) [6]. GAM замінює жорсткі лінійні коефіцієнти  $\beta X$  на гнучкі згладжуючі функції (smoothers)  $S(X)$ . На практиці найчастіше використовуються природні кубічні сплайни (natural cubic splines) — набори поліномів третього ступеня, що поєднуються у вузлах (knots) і гарантують лінійність на кінцях діапазону даних, що запобігає аномальним коливанням [29]. Гнучкість сплайна регулюється кількістю ступенів вільності (degrees of freedom, df). Зазвичай для температури та вологості встановлюють від 3 до 4df [30].

Рівень госпіталізацій залежить від дня тижня (Day of Week, DOW). Наприклад, у вихідні дні та на свята люди рідше звертаються за плановою допомогою, що може штучно знижувати медичну статистику, при цьому рівень забруднення від автотранспорту також змінюється [25]. Такі ефекти включаються в модель як категоріальні змінні.

Довгострокові часові тренди (long-term trends) та сезонність (seasonality) також необхідно відфільтрувати. Захворюваність на респіраторні інфекції має чіткий пік взимку, що збігається з піком споживання вугілля і газу теплоелектростанціями, зокрема Ладижинською ТЕС. Щоб не сплутати епідеміологічну сезонність із токсичним ефектом поллютанта, у модель вводиться часова змінна  $time$  (порядковий номер дня від початку дослідження), до якої також застосовується природний сплайн із жорстким контролем гнучкості — як правило, 6 або 7 ступенів вільності на

кожен рік спостережень  $df = 7/\text{year}$  [29]. Об'єднуючи всі вищеописані фактори, підсумкове рівняння для моделювання впливу діоксиду азоту  $NO_2$  на виникнення ішемічної хвороби серця (ІХС) на базі моделі GAM/GLM має вигляд:

$$\log(E) = \alpha + \beta_1 NO_{2t-l} + S(\text{time}_t, df = 7/\text{year}) + S(\text{time}_t, df = 3) + S(\text{hum}_t, df = 3) + \gamma DOW_t, \quad (3)$$

де:  $E$  — очікувана кількість захворювань у день  $t$ ;  $\alpha$  — базова (фонова) лінія захворюваності;  $NO_{2t-l}$  — концентрація поллютанта у день  $t$  або з урахуванням ефекту затримки у часі. Реакція серцево-судинної системи може настати як у день експозиції  $\log(O)$ , так і через декілька днів  $\log(2)$  [27].  $\beta_1$  — шуканий коефіцієнт регресії, що ізолює вплив забруднення після очищення від шуму.  $S(\dots)$  — сплайнові функції для контролю часу, температури  $\text{temp}_t$  та вологості  $\text{hum}_t$ .  $DOW_t$  — категоріальна змінна дня тижня.

Кінцева мета статистичного аналізу полягає у переведенні абстрактних математичних коефіцієнтів у клінічно зрозумілі показники ризику та формуванні стратегій управління якістю повітря.

У зв'язку з тим, що у функції зв'язку Пуассонівської моделі використовується натуральний логарифм, знайдений коефіцієнт  $\beta$  перетворюється на відносний ризик (Relative Risk, RR) шляхом експоненціювання [31]. RR показує, у скільки разів зростає ймовірність (або частота) розвитку захворювання при збільшенні концентрації забруднювача на задану одиницю  $\Delta X$  (стандартно приймається  $10 \text{ мкг/м}^3$  для  $PM_{2.5}$  та  $NO_2$ , і  $1 \text{ мкг/м}^3$  для CO) [7]:

$$RR = \exp(\beta \times \Delta X). \quad (4)$$

Для визначення статистичної достовірності знайденого ефекту розраховуються межі 95% довірчого інтервалу (95% ДІ), які спираються на стандартну похибку (SE) коефіцієнта  $\beta$  [7]:

$$\text{Lower } 95\% \text{ CI} = \exp((\beta - 1,96 \times SE) \times \Delta X); \quad \text{Upper } 95\% \text{ CI} = \exp((\beta + 1,96 \times SE) \times \Delta X)$$

Якщо розрахована нижня межа довірчого інтервалу не перетинає одиницю  $\text{Lower CI} > 1,0$ , гіпотеза про відсутність впливу відхиляється, і зв'язок між забрудненням та нозологією вважається статистично значущим [8].

Головною проблемою будь-якого обсерваційного епідеміологічного дослідження є наявність невідомих, неврахованих факторів змішування (unmeasured confounders). Навіть за умов ретельного контролю метеорології та календарних трендів, критики можуть стверджувати, що зафіксоване зростання інсультів корелює із викидами  $NO_2$  не через токсичність газу, а, наприклад, через спільний вплив психологічного стресу або рівня бідності.

Для захисту валідності результатів розроблено математичний інструмент під назвою E-значення (E-value) [32]. E-value визначає мінімальну силу асоціації, яку повинен мати потенційний неврахований конфаундер, як із впливом (забрудненням,  $RR_{EV}$ ), так і з наслідком (захворюванням,  $RR_{UD}$ ), щоб повністю знівелювати (привести до 1.0) знайдений статистичний зв'язок між ними.

Формула розрахунку E-value для відносного ризику (при  $RR > 1$ ) [33]:

$$E = RR + \sqrt{RR \times (RR - 1)}. \quad (5)$$

Для забезпечення найвищого стандарту доказовості, E-value розраховується також для нижньої межі 95% довірчого інтервалу [32]:

$$E_{CI} = LL + \sqrt{LL \times (LL - 1)} \quad (6)$$

Наприклад, спираючись на дані мета-аналізу щодо впливу  $NO_2$  на кардіоваскулярну смертність із  $RR=1,07$  (та нижньою межею  $LL=1,04$ )<sup>13</sup>, можна розрахувати E-value:

$$E = 1,07 + \sqrt{1,07 \times 0,07} \approx 1,07 + 0,27 = 1,34. \quad (7)$$

Це означає, що певний неврахований фактор повинен одночасно підвищувати ризик смертності на 34% і бути на 34% більш поширеним у дні з високим забрудненням [33]. Чим вище E-value, тим надійнішим є висновок про причинно-наслідковий характер експозиції.

Фінальним етапом аналізу є перехід від абстрактного відносного ризику до абсолютних показників медичних та демографічних втрат. У рамках процедури Оцінки впливу на здоров'я (Health Impact Assessment – HIA) визначається Популяційна атрибутивна частка (Population Attributable Fraction, PAF) [27]. PAF визначає відсоток від загальної кількості захворювань або смертей у популяції, який можна атрибутувати безпосередньо патогенній дії забруднювача атмосфери. Оскільки атмосферним повітрям дихає 100% популяції, частка осіб, що перебувають під експозицією, дорівнює одиниці ( $p=1$ ). Формула розрахунку спрощується до [34]:

$$PAF = \frac{RR-1}{RR}. \quad (8)$$

Абсолютна кількість інцидентів (додаткових інфарктів, госпіталізацій, смертей)  $\Delta Y$ , спричинених забруднювачами у досліджуваній Вінницькій області, оцінюється шляхом множення атрибутивної частки на фонову кількість зареєстрованих захворювань  $Y_{obs}$  [35]:

$$\Delta Y = Y_{obs} \times PAF. \quad (9)$$

Для практичного вирішення поставленого завдання, наведені вище теоретичні концепти реалізовані у вигляді програмного комплексу мовою Python, який легко адаптується до середовища Google Colaboratory. Ця екосистема надає доступ до потужних інструментів: pandas для маніпуляцій масивами даних, statsmodels для підгонки узагальнених лінійних моделей, та patsy для генерації базику кубічних сплайнів [23].

На рисунку 8 наведені результати роботи програмного комплексу, який демонструє залежність кількості захворювань на ІХС від концентрацій діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ) за період 2023-2025 рр., спираючись на структуру реальних епідеміологічних моделей [29].

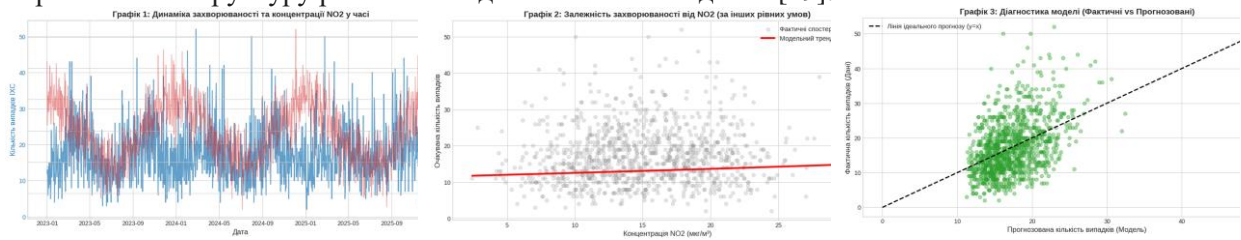


Рисунок 8 – Результати роботи програмного комплексу мовою Python

Цей програмний алгоритм цілком узгоджується із найсучаснішими стандартами аналізу, забезпечуючи надійну оцінку впливу атмосферних факторів. Використовуючи цей інструментарій, дослідники довели, що у великих містах Східної Європи до 20% госпіталізацій з приводу ішемічної хвороби серця можуть бути прямо атрибутовані впливу забруднення дрібнодисперсними частинками [27]. Інтеграція кубічних сплайнів дозволяє усунути перешкоди від аномальних погодніх коливань, а логіка від'ємної біноміальної регресії гарантує, що статистика не недооцінить розбіжності між математичним сподіванням і дисперсією захворюваності у регіонах, де спостерігається нестабільна соціально-екологічна ситуація.

Заходи щодо запобігання, зниження або ліквідації забруднення атмосферного повітря повинні передбачати впровадження сучасних рішень планувального характеру, а також враховувати можливість здійснення ефективних рішень технологічного, санітарно-технічного та організаційного характеру, позитивний вітчизняний та зарубіжний досвід їх використання, включаючи застосування маловідхідної та безвідхідної технології, комплексного використання природних ресурсів, споруд та пристроїв для ефективного вловлювання, знешкодження та утилізації шкідливих речовин і приладів для контролю вмісту їх у викидах та атмосферному повітрі [36].

## Висновки

Глобальні мета-аналізи та регіональна статистика Вінницької області, 2023–2025 рр. демонструють цілковиту синергію, підтверджуючи небезпеку експозиції до поллютантів для популяційного здоров'я. Підвищення концентрації діоксиду азоту, дрібнодисперсних аерозолів та формальдегіду є тригером, що формує патогенез як респіраторної, так і серцево-судинної захворюваності, зумовлюючи зростання рівнів летальності в працездатному віці (від 6 до 8 випадків на 10 тисяч для інсультів).

Коректна математична ідентифікація сили зв'язку в рамках моделі "концентрація-нозологія" досягається виключно за умови використання узагальнених адитивних моделей (GAM) з пуассонівським або від'ємним біноміальним розподілом та жорстким контролем метеорологічних та часових коваріат за допомогою природних кубічних сплайнів. Застосування метрик E-value та PAF для оцінки конфаундингу та атрибутивної шкоди виводить такі дослідження на рівень доказової бази, що дозволяє формувати адміністративні механізми компенсації збитків. Згідно з європейським принципом "забруднювач платить", об'єктивна ідентифікація популяційної атрибутивної частки за допомогою вищенаведеного фреймворку створює законне підґрунтя для нарахування екологічних податків, роблячи застарілі технології економічно не вигідними. Представлений програмний інструмент на Python забезпечує автоматизоване виконання цього циклу аналітики, гарантуючи епідеміологічну безпеку та стимулюючи перехід до сталого

природокористування.

Заходи захисту атмосферного повітря повинні забезпечувати додержання гігієнічних нормативів допустимого вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць: гранично допустимих концентрацій (ГДК), орієнтовних безпечних рівнів діяння (ОБРД), гранично допустимого забруднення (ГДЗ) у повітрі житлової забудови та 0,8ГДК, 0,8ОБРД, 0,8ГДЗ - у повітрі місць масового відпочинку і оздоровлення населення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Air Pollution, Health, and Economics: Evaluating the Impact of WHO targets and Guideline Values on Mortality and Morbidity in Low- and Middle-Income Countries | medRxiv, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.medrxiv.org/content/10.64898/2026.03.27.26349502v1.full-text>
- [2] Забруднення атмосферного повітря: вплив на стан здоров'я населення. / під заг. ред. М. Л. Сорока. ГС «Досить труїти Кривий Ріг» DOI: 10.13140/RG.2.2.15762.43206 [https://www.researchgate.net/publication/371701746\\_Zabrudnenna\\_atmosfernogo\\_povitra\\_vpliv\\_na\\_stan\\_zdorov'a\\_nasele](https://www.researchgate.net/publication/371701746_Zabrudnenna_atmosfernogo_povitra_vpliv_na_stan_zdorov'a_nasele)
- [3] Janne Estill Health impacts and social costs associated with air pollution in larger urban areas of Ukraine (UA) Bielstrasse 2, 3252 Worben, Switzerland <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-03/Health%20impacts%20and%20social%20costs%20associated%20with%20air%20pollution%20in%20larger%20urban%20areas%20of%20Ukraine%20%28UA%29.pdf>
- [4] Міністерство охорони здоров'я України. (2023). Аналіз показників здоров'я населення, пов'язаних з екологічними факторами. Київ: МОЗ України. <https://moz.gov.ua/storage/uploads/386da5b2-66ed-4e85-932c-d9828ba76a7a/%D0%A9%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D0%B7%D0%B2%D1%96%D1%82-%D0%B7%D0%B0-2023-%D1%80%D1%96%D0%BA.pdf>
- [5] A Systematic Review of Methodology: Time Series Regression Analysis for Environmental Factors and Infectious Diseases - PMC, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4361341/>
- [6] Module 5A Generalized Additive Models – BIOS 526 Modern Regression Analysis, доступ отримано травня 19, 2026, [https://bookdown.org/epeterson\\_2010/bios526\\_book/Module\\_5A\\_GAMs.html](https://bookdown.org/epeterson_2010/bios526_book/Module_5A_GAMs.html)
- [7] Long-term exposure to air pollution on cardio-respiratory, and lung cancer mortality: a systematic review and meta-analysis - PMC, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11180069/>
- [8] Long-Term Exposure to Particulate Matter and Mortality: An Update of the WHO Global Air Quality Guidelines Systematic Review and Meta-Analysis - Journals, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.sspjournal.org/journals/international-journal-of-public-health/articles/10.3389/ijph.2024.1607683/full>
- [9] Association between ambient fine particulate matter constituents and mortality and morbidity of cardiovascular and respiratory diseases: A systematic review and meta-analysis - PubMed, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40383471/>
- [10] Urban Air Pollution and Cardiovascular Health: A Study of PM 2.5 and CVD Morbidity in a Metropolitan City, Karachi (Pakistan) - MDPI, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2813-4168/4/1/5>
- [11] Long-term NO2 exposure and mortality: A comprehensive meta-analysis - PubMed, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37984474/>
- [12] Nitrogen dioxide and mortality: review and meta-analysis of long-term studies, доступ отримано травня 19, 2026, <https://publications.ersnet.org/content/erj/44/3/744>
- [13] Shadows in the Air: Mental health vulnerabilities under PM10 and PM2.5, before and after COVID-19 - PMC, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12148488/>
- [14] Noncancer Health Effects - Review of EPA's 2022 Draft Formaldehyde Assessment - NCBI, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK600425/>
- [15] Under the Microscope: Formaldehyde Exposure in National Health Service Pathology Departments in the United Kingdom | medRxiv, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2025.08.22.25333970v2.full-text>
- [16] The External Exposome and Life Expectancy: Formaldehyde as a Leading Predictor in U.S. Counties - MDPI, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2813-4168/4/2/10>
- [17] Health effects of low-dose formaldehyde exposure: a cross-sectional study in occupational, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pdfs.semanticscholar.org/86ce/4dc832313ae13ce00f7240d073e5244284a1.pdf>
- [18] Formaldehyde Exposure and Associated Health Burdens Apportioned to Residential and Public Places Based on Personal and Environmental Measurements - MDPI, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2073-4433/16/10/1165>
- [19] Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Вінницькій області у 2023 році. Вінницька обласна військова адміністрація Управління розвитку територій та інфраструктури <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoring/ekologichni-pasporty/>
- [20] <https://www.saveecobot.com/maps/vinnytsia>
- [21] Звіт про роботу департаменту охорони здоров'я міської ради за 2025 рік <https://www.vmr.gov.ua/departament-okhorony-zdorovia#parentHorizontalTab3>
- [22] Time series regression studies in environmental epidemiology - PMC - NIH, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3780998/>
- [23] Poisson regression in python - Learning deep, доступ отримано травня 19, 2026, [https://omarfsosa.github.io/poisson\\_regression\\_in\\_python](https://omarfsosa.github.io/poisson_regression_in_python)
- [24] Generalized Linear Models to Forecast Malaria Incidence in Three Endemic Regions of Senegal - PMC, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10341430/>
- [25] Time-Series Analysis of Air Pollution and Health Accounting for Covariate-Dependent Overdispersion - PMC, доступ

- отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6269244/>
- [26] The effect of known and unknown confounders on the relationship between air pollution and Covid-19 mortality in Italy: A sensitivity analysis of an ecological study based on the E-value - PMC, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8487852/>
- [27] Study of the Relationship Between Urban Microclimate, Air Pollution, and Human Health in the Three Biggest Cities in Bulgaria - MDPI, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2413-8851/10/2/69>
- [28] Evaluation of the Influence between Local Meteorology and Air Quality in Beijing Using Generalized Additive Models - MDPI, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/1/24>
- [29] Hand, Foot, and Mouth Disease Risk Prediction in Southern China: Time Series Study Integrating Web-Based Search and Epidemiological Surveillance Data - JMIR Infodemiology, доступ отримано травня 19, 2026, <https://infodemiology.jmir.org/2025/1/e75434>
- [30] Cardiopulmonary Effects of Fine Particulate Matter Exposure among Older Adults, during Wildfire and Non-Wildfire Periods, in the United States 2008–2010 - PMC, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6768318/>
- [31] Toxicological Profile for Formaldehyde - Agency for Toxic Substances and Disease Registry | ATSDR, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp111.pdf>
- [32] The E-Value in Regression: A Useful, Simple, Easily Understood, and Easily Applied Statistic - Psychiatrist.com, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.psychiatrist.com/jcp/e-value-regression-useful-easily-understood-easily-applied-statistic/>
- [33] Website and R Package for Computing E-Values - PMC - NIH, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6066405/>
- [34] Air Pollution Attributable Cases - Santé publique France, доступ отримано травня 19, 2026, [https://www.santepubliquefrance.fr/sites/default/files/rdd/document/27757\\_5173-d4140.pdf](https://www.santepubliquefrance.fr/sites/default/files/rdd/document/27757_5173-d4140.pdf)
- [35] Introduction to Health Impact Assessment of air pollution, доступ отримано травня 19, 2026, [https://www.healtheffects.org/sites/default/files/media/lecture\\_introduction\\_to\\_health\\_impact\\_assessment.pdf](https://www.healtheffects.org/sites/default/files/media/lecture_introduction_to_health_impact_assessment.pdf)
- [36] ДСП 201-97 Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами)

## REFERENCES

- [1] Air Pollution, Health, and Economics: Evaluating the Impact of WHO targets and Guideline Values on Mortality and Morbidity in Low- and Middle-Income Countries | medRxiv, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.medrxiv.org/content/10.64898/2026.03.27.26349502v1.full-text>
- [2] Zabrudnennia atmosfernoho povitria: vplyv na stan zdorovia naseleennia. / pid zah. red. M. L. Soroka. HS «Dosyt truity Kryvyi Rih» DOI: 10.13140/RG.2.2.15762.43206 [https://www.researchgate.net/publication/371701746\\_Zabrudnennia\\_atmosfernogo\\_povitria\\_vplyv\\_na\\_stan\\_zdorova\\_naseleennia](https://www.researchgate.net/publication/371701746_Zabrudnennia_atmosfernogo_povitria_vplyv_na_stan_zdorova_naseleennia)
- [3] Janne Estill Health impacts and social costs associated with air pollution in larger urban areas of Ukraine (UA) Bielstrasse 2, 3252 Worben, Switzerland <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-03/Health%20impacts%20and%20social%20costs%20associated%20with%20air%20pollution%20in%20larger%20urban%20areas%20of%20Ukraine%20%28UA%29.pdf>
- [4] Ministerstvo ochorony zdorovia Ukrainy. (2023). Analiz pokaznykiv zdorovia naseleennia, poviazanykh z ekolohichnymy faktoramy. Kyiv: MOZ Ukrainy. <https://moz.gov.ua/storage/uploads/386da5b2-66ed-4e85-932c-d9828ba76a7a/%D0%A9%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D0%B7%D0%B2%D1%96%D1%82-%D0%B7%D0%B0-2023-%D1%80%D1%96%D0%BA.pdf>
- [5] A Systematic Review of Methodology: Time Series Regression Analysis for Environmental Factors and Infectious Diseases - PMC, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4361341/>
- [6] Module 5A Generalized Additive Models – BIOS 526 Modern Regression Analysis, доступ отримано травня 19, 2026, [https://bookdown.org/epeterson\\_2010/bios526\\_book/Module\\_5A\\_GAMs.html](https://bookdown.org/epeterson_2010/bios526_book/Module_5A_GAMs.html)
- [7] Long-term exposure to air pollution on cardio-respiratory, and lung cancer mortality: a systematic review and meta-analysis - PMC, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11180069/>
- [8] Long-Term Exposure to Particulate Matter and Mortality: An Update of the WHO Global Air Quality Guidelines Systematic Review and Meta-Analysis - Journals, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.sspj-journal.org/journals/international-journal-of-public-health/articles/10.3389/ijph.2024.1607683/full>
- [9] Association between ambient fine particulate matter constituents and mortality and morbidity of cardiovascular and respiratory diseases: A systematic review and meta-analysis - PubMed, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40383471/>
- [10] Urban Air Pollution and Cardiovascular Health: A Study of PM 2.5 and CVD Morbidity in a Metropolitan City, Karachi (Pakistan) - MDPI, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2813-4168/4/1/5>
- [11] Long-term NO2 exposure and mortality: A comprehensive meta-analysis - PubMed, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37984474/>
- [12] Nitrogen dioxide and mortality: review and meta-analysis of long-term studies, доступ отримано травня 19, 2026, <https://publications.ersnet.org/content/erj/44/3/744>
- [13] Shadows in the Air: Mental health vulnerabilities under PM10 and PM2.5, before and after COVID-19 - PMC, доступ отримано травня 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12148488/>
- [14] Noncancer Health Effects - Review of EPAs 2022 Draft Formaldehyde Assessment - NCBI, доступ отримано травня 19, 2026, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK600425/>

- [15] Under the Microscope: Formaldehyde Exposure in National Health Service Pathology Departments in the United Kingdom | medRxiv, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2025.08.22.25333970v2.full-text>
- [16] The External Exposome and Life Expectancy: Formaldehyde as a Leading Predictor in U.S. Counties - MDPI, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2813-4168/4/2/10>
- [17] Health effects of low-dose formaldehyde exposure: a cross-sectional study in occupational, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://pdfs.semanticscholar.org/86ce/4dc832313ae13ce00f7240d073e5244284a1.pdf>
- [18] Formaldehyde Exposure and Associated Health Burdens Apportioned to Residential and Public Places Based on Personal and Environmental Measurements - MDPI, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2073-4433/16/10/1165>
- [19] Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyschcha u Vinnytskii oblasti u 2023 rotsi. Vinnytska oblasna viiskova administratsiia Upravlinnia rozvytku terytorii ta infrastruktury <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichni-pasporty/>
- [20] <https://www.saveecobot.com/maps/vinnytsia>
- [21] Zvit pro robotu departamentu okhorony zdorov'ia miskoi rady za 2025 rik <https://www.vmr.gov.ua/departament-okhorony-zdorovia#parentHorizontalTab3>
- [22] Time series regression studies in environmental epidemiology - PMC - NIH, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3780998/>
- [23] Poisson regression in python - Learning deep, dostup otrymano travnia 19, 2026, [https://omarfsosa.github.io/poisson\\_regression\\_in\\_python](https://omarfsosa.github.io/poisson_regression_in_python)
- [24] Generalized Linear Models to Forecast Malaria Incidence in Three Endemic Regions of Senegal - PMC, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10341430/>
- [25] Time-Series Analysis of Air Pollution and Health Accounting for Covariate-Dependent Overdispersion - PMC, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6269244/>
- [26] The effect of known and unknown confounders on the relationship between air pollution and Covid-19 mortality in Italy: A sensitivity analysis of an ecological study based on the E-value - PMC, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8487852/>
- [27] Study of the Relationship Between Urban Microclimate, Air Pollution, and Human Health in the Three Biggest Cities in Bulgaria - MDPI, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2413-8851/10/2/69>
- [28] Evaluation of the Influence between Local Meteorology and Air Quality in Beijing Using Generalized Additive Models - MDPI, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/1/24>
- [29] Hand, Foot, and Mouth Disease Risk Prediction in Southern China: Time Series Study Integrating Web-Based Search and Epidemiological Surveillance Data - JMIR Infodemiology, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://infodemiology.jmir.org/2025/1/e75434>
- [30] Cardiopulmonary Effects of Fine Particulate Matter Exposure among Older Adults, during Wildfire and Non-Wildfire Periods, in the United States 2008–2010 - PMC, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6768318/>
- [31] Toxicological Profile for Formaldehyde - Agency for Toxic Substances and Disease Registry | ATSDR, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp111.pdf>
- [32] The E-Value in Regression: A Useful, Simple, Easily Understood, and Easily Applied Statistic - Psychiatrist.com, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://www.psychiatrist.com/jcp/e-value-regression-useful-easily-understood-easily-applied-statistic/>
- [33] Website and R Package for Computing E-Values - PMC - NIH, dostup otrymano travnia 19, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6066405/>
- [34] Air Pollution Attributable Cases - Santé publique France, dostup otrymano travnia 19, 2026, [https://www.santepubliquefrance.fr/sites/default/files/rdd/document/27757\\_5173-d4140.pdf](https://www.santepubliquefrance.fr/sites/default/files/rdd/document/27757_5173-d4140.pdf)
- [35] Introduction to Health Impact Assessment of air pollution, dostup otrymano travnia 19, 2026, [https://www.healtheffects.org/sites/default/files/media/lecture\\_introduction\\_to\\_health\\_impact\\_assessment.pdf](https://www.healtheffects.org/sites/default/files/media/lecture_introduction_to_health_impact_assessment.pdf)
- [36] DSP 201-97 Derzhavni sanitarni pravyla okhorony atmosfernoho povitria naselenykh mist (vid zabrudnennia khimichnymy ta biolohichnymy rehovynamy)

**Васильківський Ігор Володимирович** – к.т.н, доцент кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля. Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: [vasilkvskij@vntu.edu.ua](mailto:vasilkvskij@vntu.edu.ua) ORCID 0000-0002-1514-6569.

**Зелінський Дмитро В'ячеславович** – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля. Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: [dizelinskiy@gmail.com](mailto:dizelinskiy@gmail.com).

**I. Vasykivsky  
D. Zelinsky**

## TOXIC IMPACT OF POLLUTANT EMISSIONS ON THE MORBIDITY OF THE POPULATION OF VINNYCHY REGION

Vinnytsia National Technical University

*The materials of the World Health Organization (WHO) indicate that the health of the population is significantly affected by the environment. This impact can be 30% or more. Atmospheric air is the primary and most important natural resource of the environment necessary for the existence of all living organisms, and with which the greatest number of risks of diseases of living organisms and humans are associated. Atmospheric air pollution leads to poisoning of the population with toxic*

*substances, deterioration of health, decreased working capacity and worsens living conditions. According to WHO information, in recent years Ukraine has ranked first in the world in terms of mortality per capita caused by atmospheric air pollution. At the same time, atmospheric air is one of the main production natural resources for most technological processes in the biosphere of planet Earth. In all areas of nature management, anthropogenic loads on atmospheric air and the environment must ensure the safety of human habitation and not lead to the degradation of natural ecosystems. The main pollutants of atmospheric air in the territory of Vinnytsia region remain enterprises of the energy industry, agriculture, processing industry and transport enterprises.*

*The article reviews statistical data on atmospheric air pollution in Vinnytsia region for 2023-2025. Emissions into atmospheric air by types of economic activity, main pollutants and levels of pollutants in atmospheric air are analyzed. Exceedances of the maximum permissible concentration of pollutants and their toxic effects are recorded based on the results of the implementation of the plan for monitoring studies of atmospheric air quality in 2025. Regional indicators of the structure of general morbidity of the population for 2023-2025 are analyzed. The dynamics of the increase in morbidity indicators, in particular pulmonary diseases, diseases of the circulatory system, which negatively affect the reproductive health of the population, are revealed.*

**Keywords:** *atmospheric air pollution, emissions of pollutants, nosological diseases, pulmonary diseases, diseases of the circulatory system.*

**Igor Vasylykivskyi** – Ph.D. Docent of department of ecology, chemistry and environmental protection technologies. Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, Ukraine. email: [vasilkvskij@vntu.edu.ua](mailto:vasilkvskij@vntu.edu.ua) ORCID 0000-0002-1514-6569.

**Dmytro Zelinsky** – postgraduate of department of ecology, chemistry and environmental protection technologies. Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, Ukraine. email: [dizelinskiy@gmail.com](mailto:dizelinskiy@gmail.com).