

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У М.ВІННИЦЯ ЗА 2022-2025 РР

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

У тезах розглянуто динаміку якості атмосферного повітря в місті Вінниця у 2022–2025 роках. Основну увагу приділено аналізу показників індексу якості повітря (AQI) та концентрації дрібнодисперсних частинок PM_{2.5} як ключових індикаторів забруднення. Дослідження спрямоване на виявлення основних тенденцій змін якості повітря, сезонних коливань та періодів підвищеного забруднення. Отримані результати дозволяють оцінити екологічний стан міста та можуть бути використані для прогнозування та розробки заходів щодо покращення якості атмосферного повітря.

Ключові слова: якість повітря, AQI, PM_{2.5}, екологічний моніторинг, забруднення повітря, Вінниця.

Abstract

The thesis examines the dynamics of air quality in the city of Vinnytsia during 2022–2025. The main focus is on the analysis of the Air Quality Index (AQI) and PM_{2.5} concentration as key indicators of pollution. The study aims to identify major trends in air quality changes, seasonal variations, and periods of increased pollution. The obtained results make it possible to assess the environmental condition of the city and can be used for forecasting and developing measures to improve air quality.

Keywords: air quality, AQI, PM_{2.5}, environmental monitoring, air pollution, Vinnytsia.

Вступ

У сучасних умовах інтенсивного розвитку урбанізованих територій проблема якості атмосферного повітря набуває особливої актуальності. Забруднення повітря є одним із ключових факторів негативного впливу на здоров'я населення, екосистеми та загальний рівень екологічної безпеки міст. Основними джерелами забруднення в міських умовах є транспорт, промислові підприємства, а також сезонні фактори, зокрема опалення у холодний період року.

Місто Вінниця, як адміністративний та промисловий центр, також зазнає впливу цих чинників. Незважаючи на відносно сприятливу екологічну ситуацію порівняно з великими промисловими містами, проблема якості повітря залишається актуальною та потребує системного аналізу.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оцінки змін якості атмосферного повітря у часовому розрізі, що дозволяє виявити тенденції, сезонні закономірності та періоди підвищеного рівня забруднення. Особливу увагу приділено аналізу індексу якості повітря (AQI) та концентрації дрібнодисперсних частинок PM_{2.5}, які є важливими індикаторами стану атмосферного повітря.

Метою даної роботи є аналіз динаміки якості атмосферного повітря в місті Вінниця за період 2022–2025 років, виявлення основних тенденцій змін показників та оцінка впливу сезонних факторів на рівень забруднення.

Результати дослідження

У ході дослідження було проведено аналіз якості атмосферного повітря у місті Вінниця за період 2022–2026 років на основі щоденних значень індексу якості повітря (AQI) та концентрації дрібнодисперсних частинок PM_{2.5}. Для забезпечення більш наочного аналізу погодинні дані були агреговані до середньодобових значень, що дозволило виявити загальні тенденції та закономірності.

На першому етапі було проаналізовано часову динаміку індексу якості повітря. Отриманий графік демонструє значні коливання показників AQI протягом усього досліджуваного періоду. При цьому використання згладжування (7-денне та 30-денне ковзне середнє) дозволило виділити загальний тренд та зменшити вплив короточасних коливань. Встановлено, що більшість значень AQI перебуває у межах помірного рівня, однак періодично фіксуються підвищення до рівнів, що можуть бути шкідливими для чутливих груп населення [1].

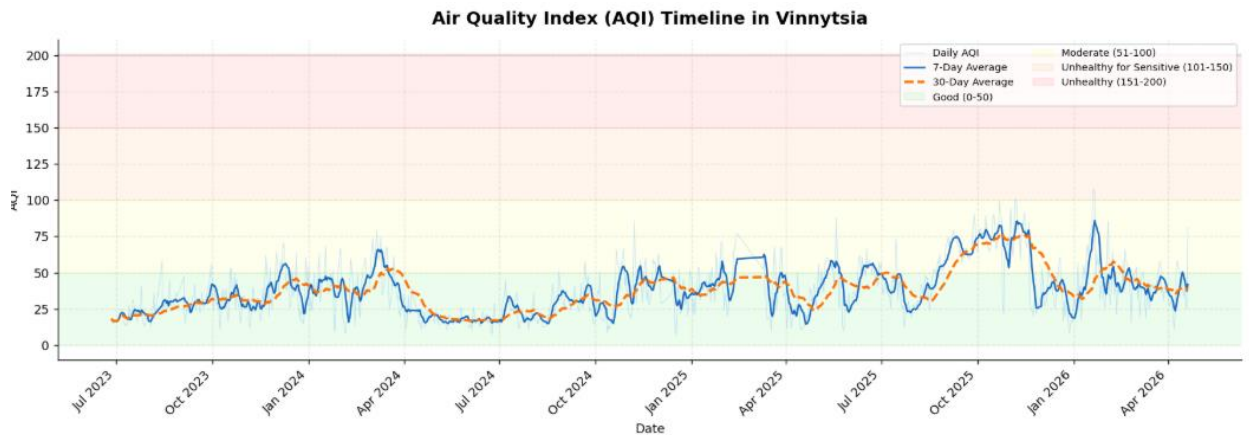


Рис. 1. Динаміка індексу якості повітря (AQI) у м. Вінниця з використанням ковзних середніх (7 та 30 днів)

Аналіз часової динаміки свідчить про те, що якість повітря у місті має виражений циклічний характер із чіткими сезонними коливаннями. На графіку помітно, що більшу частину часу індекс AQI перебуває в межах «зеленої» зони (0–50), що відповідає доброму стану повітря, проте регулярні сплески виводять показник у «жовту» зону (50–100), яка класифікується як помірна. Застосування 7-денного та 30-денного ковзних середніх дозволяє нівелювати щоденний «шум» і виявити, що найскладніші періоди зазвичай припадають на холодні місяці: кінець осені, зиму та початок весни (піки спостерігаються в районі січня 2024-го, січня 2025-го та особливо відчутно наприкінці 2025 року).

Цікаво, що у 2025 році спостерігалася затяжна фаза підвищеного AQI, яка тривала з жовтня по грудень, де 30-денне середнє тривалий час трималося на рівні близько 75 одиниць. Це вказує на тривалі несприятливі умови, ймовірно пов'язані з опалювальним сезоном або антициклонами, що перешкоджають розсіюванню домішок. Водночас літні періоди (особливо липень 2024 року) демонструють стабільно низькі показники AQI, що свідчить про природне самоочищення атмосфери. Максимальні поодинокі добові значення іноді перетинають позначку 100, наближаючись до рівня, шкідливого для чутливих груп, але за весь період спостережень критичних виходів у «червону» зону (вище 150) не зафіксовано [2].

Наступним етапом було дослідження концентрації PM_{2.5}, яка є одним із найнебезпечніших забруднювачів повітря. Аналіз показав, що значення PM_{2.5} протягом досліджуваного періоду мають нерівномірний характер із вираженими піками. Особливу увагу привертають періоди, коли концентрація перевищує рекомендовані норми Всесвітньої організації охорони здоров'я. Це свідчить про потенційні ризики для здоров'я населення та необхідність контролю за джерелами забруднення.



Рис. 2. Динаміка концентрації PM_{2.5} у м. Вінниця з відображенням граничних значень ВООЗ

Аналіз часової динаміки концентрації PM_{2.5} у Вінниці за період з липня 2023 року по квітень 2026 року вказує на складну екологічну ситуацію з вираженою нестабільністю показників. Протягом більшої частини 2023-го та першої половини 2024-го років концентрація дрібнодисперсних частинок залишалася відносно низькою, коливаючись навколо річного ліміту ВООЗ (5 мкг/м³), проте вже тоді спостерігалися епізодичні перевищення добової норми (15 мкг/м³).

Критичне погіршення якості повітря зафіксовано у другій половині 2025 року, коли середньодобові значення почали системно та суттєво перевищувати безпечні межі, досягаючи пікових значень понад 120–140 мкг/м³. Використання 7-денного та 30-денного ковзних середніх дозволяє чітко ідентифікувати затяжний період екстремального забруднення, що тривав з літа до кінця осені 2025 року [3]. Такий характер кривої може бути наслідком поєднання несприятливих метеорологічних умов (температурних інверсій) та специфічних локальних факторів впливу. На початку 2026 року спостерігається тенденція до зниження показників, проте рівень забруднення все ще періодично перетинає межу добового ліміту ВООЗ, що підтверджує необхідність постійного моніторингу та впровадження заходів із контролю за джерелами викидів у місті [4].

Для оцінки довгострокових змін було проведено аналіз середньорічних значень показників AQI та PM2.5. Отримані результати дозволяють порівняти рівень забруднення між різними роками та визначити загальні тенденції. Встановлено, що середні значення залишаються відносно стабільними, без різких змін, що свідчить про відсутність критичного погіршення або покращення якості повітря. Водночас варіативність показників вказує на наявність періодичних коливань.

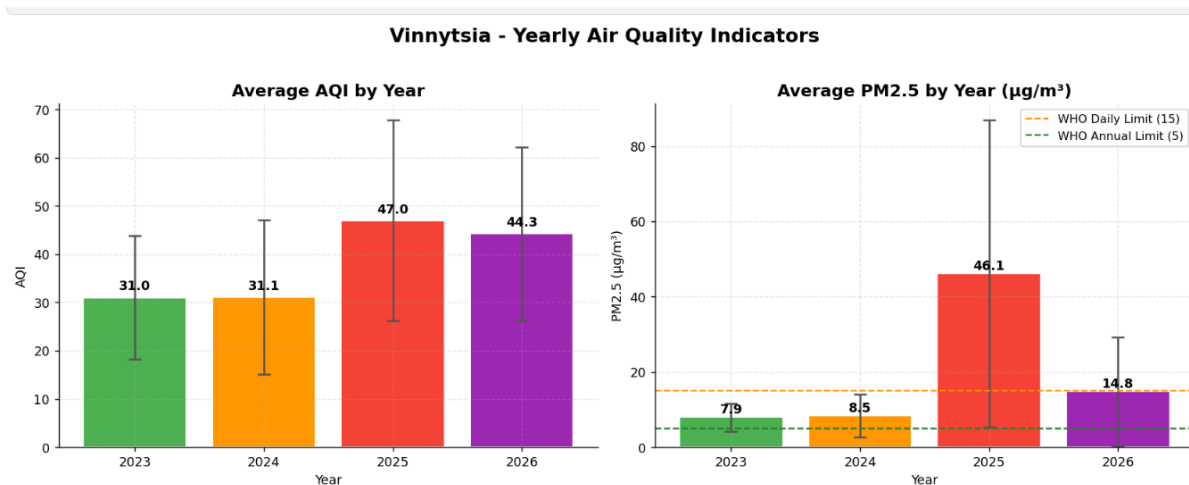


Рис. 3. Порівняння середніх значень AQI та PM2.5 за роками

Аналіз середньорічних показників якості повітря у Вінниці демонструє різку деградацію екологічної ситуації у 2025 році порівняно з попередніми роками. Якщо у 2023 та 2024 роках середні значення AQI трималися на відносно стабільному рівні близько 31 одиниці, то у 2025 році цей показник зріс до 47.0, супроводжуючись значною варіативністю даних. Ще більш тривожною є динаміка концентрації PM2.5: після помірних значень у 2023–2024 роках (7.9–8.5 мкг/м³), середньорічний показник у 2025 році злетів до 46.1 мкг/м³, що майже вдесятеро перевищує рекомендований річний ліміт ВООЗ (5 мкг/м³) і втричі — добовий ліміт. Показники 2026 року демонструють певне покращення порівняно з піковим 2025-м, проте середнє значення PM2.5 (14.8 мкг/м³) все ще балансує на межі критичної добової норми. Велика амплітуда стандартного відхилення, особливо помітна у 2025 році, свідчить про часті екстремальні викиди забруднювачів, які суттєво впливають на загальну статистику та створюють серйозні ризики для здоров'я населення протягом тривалих періодів [5].

Аналіз сезонних змін дозволив виявити чітку залежність якості повітря від пори року. Найвищі рівні забруднення спостерігаються у зимовий період, що пов'язано з використанням систем опалення та несприятливими метеорологічними умовами. У весняно-літній період показники значно покращуються, що пояснюється активною циркуляцією повітря та зменшенням антропогенного навантаження. Осінній період характеризується поступовим зростанням рівня забруднення.

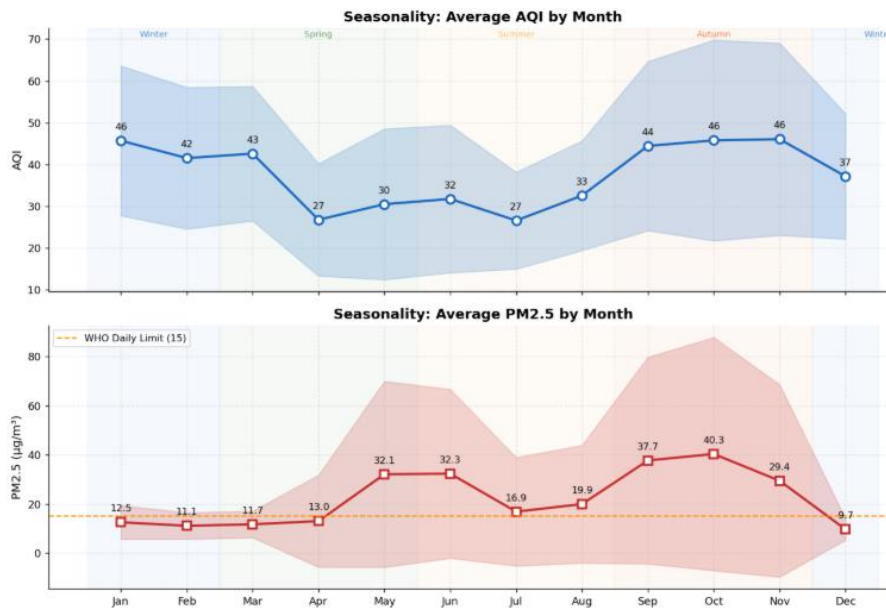


Рис. 4. Сезонна динаміка середніх значень AQI та PM2.5 за місяцями

Аналіз сезонних коливань якості повітря у Вінниці виявляє чітку бімодальну залежність із двома вираженими періодами зростання рівня забруднення. Перший пік спостерігається наприкінці весни та на початку літа (травень-червень), коли середні значення PM2.5 перевищують 32 мкг/м³, що, ймовірно, пов'язано з активним пилком, сезонними сільськогосподарськими роботами або специфічними атмосферними процесами. Другий, більш інтенсивний період тривалого забруднення, припадає на осінь (вересень-листопад), де концентрація PM2.5 досягає свого максимуму у жовтні (40.3 мкг/м³). Осінній пік супроводжується найбільшою варіативністю даних, що вказує на часті та критичні стрибки концентрації часток, які у декілька разів перевищують добовий ліміт ВООЗ. Хоча індекс AQI залишається у відносно помірному діапазоні протягом року, показники PM2.5 демонструють системне порушення норм безпеки протягом шести місяців на рік. Найбільш сприятливим періодом для якості повітря є грудень та перші місяці року, коли значення опускаються нижче граничної позначки 15 мкг/м³, забезпечуючи тимчасове екологічне розвантаження міського середовища.

Для більш детального аналізу варіативності показників було побудовано boxplot-діаграми розподілу AQI за роками. Вони дозволяють оцінити не лише середні значення, але й розкид даних, наявність викидів та асиметрію розподілу. Аналіз показав, що в усі роки присутні аномальні значення, які свідчать про епізодичні погіршення якості повітря.

AQI Distribution by Year - Vinnytsia

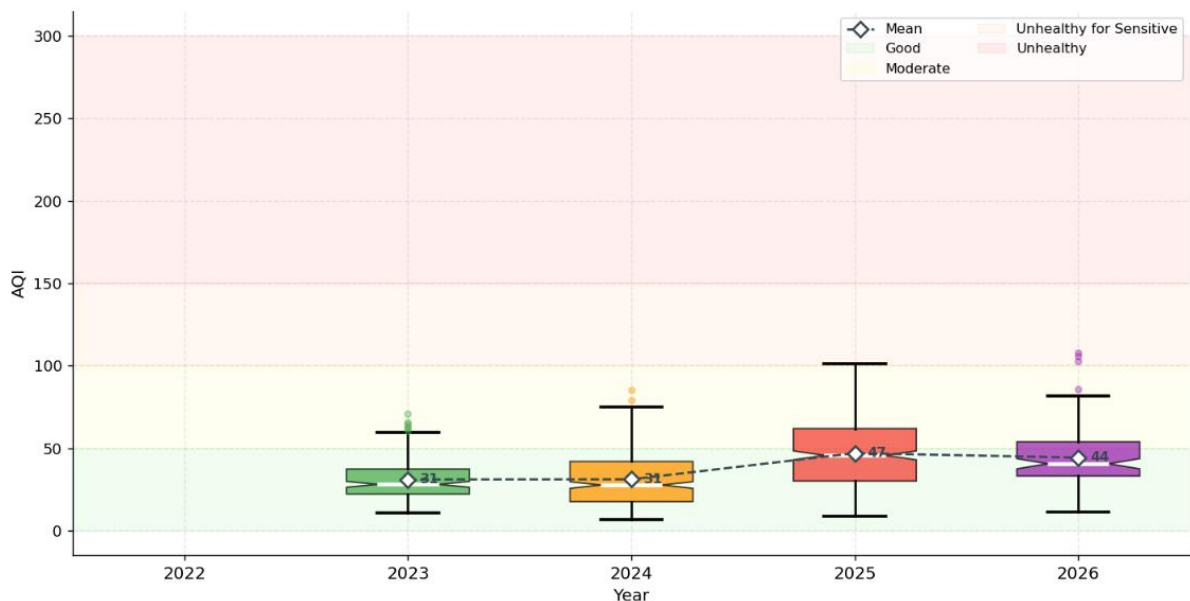


Рис. 5. Розподіл значень AQI за роками (boxplot)

Аналіз розподілу індексу якості повітря (AQI) за допомогою boxplot-діаграм підтверджує поступове зміщення показників у зону вищого екологічного ризику протягом 2023–2026 років. У 2023 та 2024 роках основна маса значень зосереджувалася в межах категорії «Добре» (Good), про що свідчить розташування міжквартильного розмаху нижче позначки 50 одиниць. Однак, починаючи з 2025 року, спостерігається помітне розширення боксів та підняття медіани, що вказує на зростання частки днів із «Помірним» (Moderate) рівнем забруднення. Особливу увагу привертають 2025 та 2026 роки, де верхні «вуса» та численні аномальні викиди (outliers) сягають і перетинають позначку 100 одиниць, входячи в зону, шкідливу для чутливих груп населення. Збільшення вертикального розміру боксів свідчить про зростання непередбачуваності та варіативності якості повітря в місті. Хоча середнє значення (Mean) демонструє стабілізацію в останній період, наявність екстремальних точок у 2026 році підкреслює, що епізоди гострого погіршення стану атмосфери стають більш вираженими та регулярними.

Додатково було проведено узагальнюючий статистичний аналіз [7, 8], який включає середні, медіанні та максимальні значення показників, а також частку днів із перевищенням безпечного рівня AQI. Отримані результати підтверджують, що, незважаючи на переважно помірний рівень забруднення, у місті періодично виникають несприятливі екологічні ситуації.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було проаналізовано динаміку якості атмосферного повітря у місті Вінниця за період 2022–2026 років на основі показників індексу якості повітря (AQI) та концентрації дрібнодисперсних частинок PM_{2.5}.

Встановлено, що якість повітря у місті в цілому характеризується помірним рівнем забруднення, однак протягом досліджуваного періоду спостерігаються значні коливання показників. Аналіз часових рядів показав наявність короточасних піків забруднення, які можуть перевищувати безпечні рівні та становити потенційну загрозу для здоров'я населення.

Дослідження концентрації PM_{2.5} підтвердило, що саме цей показник є одним із ключових факторів формування індексу AQI. У окремі періоди його значення перевищують рекомендовані норми, що свідчить про наявність джерел забруднення та необхідність їх контролю.

Аналіз середньорічних значень показав відносну стабільність показників без різко вираженої тенденції до покращення або погіршення якості повітря. Це свідчить про те, що екологічна ситуація у місті залишається стабільною, але потребує подальшого моніторингу.

Виявлена сезонна залежність підтверджує, що найгірші показники якості повітря спостерігаються у зимовий період, тоді як у весняно-літній період ситуація покращується. Це зумовлено як антропогенними факторами (опалення), так і природними умовами (циркуляція повітря).

Таким чином, проведене дослідження дозволило виявити основні закономірності змін якості атмосферного повітря у місті Вінниця, а отримані результати можуть бути використані для подальшого прогнозування та розробки заходів щодо зниження рівня забруднення та покращення екологічного стану міського середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Air quality in Ukraine: AQI and PM_{2.5} data [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.iqair.com/ukraine>
2. Kirešová S., Guzan M., Rusyn V. Particulate Matter PM_{2.5} and PM₁₀ and Its Impact on Air Quality in Urban and Rural Areas [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/366593174>
3. Boychenko S. et al. Features of aerosol pollution of atmosphere by PM_{2.5} and PM₁₀ particles [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://journal.chnpu.edu.ua/index.php/biota/article/view/205>
4. Monitoring Air Pollution in Wartime Kyiv: PM_{2.5} Spikes Study [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2413-8851/9/11/477>
5. Thangavel et al. Air pollution and PM_{2.5} impact on environment and health [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972307657X>
6. Vinnytsia Air Quality Analysis (2022–2026). Vinnytsia Air Quality Analysis (2022–2026) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.kaggle.com/code/annaparadzhanova/vinnytsia-air-quality-analysis-2022-2026>
7. Наука про дані: машинне навчання та інтелектуальний аналіз даних : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережевого) використання [Електронний ресурс] / В. Б. Мокін, М. В. Дратованій – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 258 с.
8. Системний аналіз стану атмосферного повітря регіону, з урахуванням впливу аномалій: монографія [Електронний ресурс] / Д. О. Шмундяк, В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – (PDF, 169 с.)

Параджанова Анна Денисівна – студентка групи 2ІСТ-22б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: annaparadzhanova@gmail.com

Євгеній Миколайович Крижановський – канд. техн. наук, доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kruzhan@gmail.com

Ігор Миколайович Штельмах – канд. техн. наук, асистент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: igor.shtelmakh@vntu.edu.ua.

Parajanova Anna D. – student of group 2IST-22b, Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: annaparadzhanova@gmail.com

Kryzhanovsky, Evgeniy M. - candidate of technical sciences, associate professor of the Department of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kruzhan@gmail.com

Shtelmah, Igor M. – candidate of technical sciences, assistant professor of the Department of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: igor.shtelmakh@vntu.edu.ua.