

УДК 504.3.054:551.510.42:311(477.74)
DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.4-67.23>

СТАТИСТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ NO_2 В УРБАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ (НА ПРИКЛАДІ М. ОДЕСА)

Владимирова О.Г., Тимошук М.О., Гарабазій Т.А., Бургаз О.А.
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
вул. Львівська, 15, 65016, м. Одеса

veg2008@ukr.net, marinodessa@gmail.com, environ65odessa@gmail.com, alexburgaz84@gmail.com

Статтю присвячено комплексному статистичному аналізу та оцінці просторово-часової динаміки вмісту діоксиду азоту (NO_2) в атмосферному повітрі великого урбанізованого центру та транспортного вузла – м. Одеса. Актуальність роботи обумовлена високим антропогенним тиском на повітряний басейн міста та необхідністю оцінювання стану екологічної безпеки на основі статистичних методів. Дослідження базується на масиві даних строкових спостережень, отриманих на пунктах спостереження за забрудненням атмосферного повітря (ПСЗ) протягом 2017–2021 рр. Методологія охоплює перевірку однорідності рядів, розрахунок статистичних параметрів розподілу (математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення, асиметрія, ексцес) за допомогою комплексу STATISTICA та побудову емпіричних гістограм.

Порівняльний аналіз зафіксував синхронні щомісячні зміни рівня NO_2 на тлі поступового зменшення загального забруднення повітря. Встановлено чітку просторову диференціацію міської території за двома типами екологічного стану. Перший тип репрезентує умовно референтна прибережна зона (ПСЗ № 8), де середні концентрації перебувають у межах санітарно-гігієнічного нормативу (87% від ГДК_{сд}), проте фіксується стійкий аптренд забруднення, що вказує на поширення техногенного тиску на рекреаційні локації. Другий тип формує деструктивний промислово-транспортний кластер (ПСЗ № 10–20), де рівні хронічно перевищують санітарно-гігієнічний норматив в 1,5–1,65 рази. Наявність від’ємної асиметрії верифікує безперервний характер високого забруднення, за якого стан чистоти повітря є аномальним винятком. Максимальний рівень акумуляції NO_2 ідентифіковано на ПСЗ № 18 (вул. Балківська), де екстремуми сягають значення 1,96 ГДК_{сд}.

Практичне значення результатів полягає у можливості їх імплементації в діяльність органів місцевого самоврядування, суб’єктів моніторингу та природоохоронних установ для модернізації систем екологічного контролю, оптимізації транспортних потоків та побудови моделей предиктивного аналізу міського середовища. *Ключові слова:* діоксид азоту, атмосферне повітря, статистичні параметри, моніторинг, асиметрія, ексцес, ГДК_{сд}, урбоекосистема, м. Одеса.

Statistical patterns of the spatial distribution of NO_2 in an urban environment (using the city of Odesa as an example).
Vladymyrova O., Timoshchuk M., Garabagii T., Burhaz O.

The article is devoted to a comprehensive statistical analysis and assessment of the spatio-temporal dynamics of nitrogen dioxide (NO_2) concentrations in the atmospheric air of a large urban center and transportation hub – Odesa, Ukraine. The relevance of the study is determined by the high anthropogenic pressure on the city’s air basin and the need to assess the state of environmental safety using statistical methods. The research is based on a dataset of routine observations obtained at air pollution monitoring stations (APMSs) during the period 2017–2021. The methodology includes testing the homogeneity of the observation series, calculating statistical distribution parameters (mean, standard deviation, skewness, and kurtosis) using the STATISTICA software package, and constructing empirical histograms.

Comparative analysis revealed synchronous monthly variations in NO_2 concentrations against the background of a gradual decline in the overall level of air pollution. A clear spatial differentiation of the urban area into two types of environmental conditions was identified. The first type is represented by the relatively reference coastal zone (APMS No.8), where average concentrations remain within the sanitary standard (87% of the maximum permissible average daily concentration, MPCad). However, a persistent upward trend in pollution was detected, indicating the expansion of anthropogenic pressure into recreational areas. The second type is represented by a heavily polluted industrial and transport cluster (APMSs No.10–20), where concentration levels chronically exceed the sanitary standard by 1.5–1.65 times. The presence of negative skewness confirms the continuous nature of elevated pollution levels, under which clean air conditions become an anomalous exception. The highest level of NO_2 accumulation was identified at APMS No.18 (Balkivska Street), where peak concentrations reached 1.96 MPCad.

The practical significance of the obtained results lies in their potential implementation by local self-government authorities, environmental monitoring agencies, and environmental protection institutions for the modernization of environmental monitoring systems, optimization of traffic flows, and development of predictive models of the urban environment. *Key words:* nitrogen dioxide, atmospheric air, statistical parameters, monitoring, skewness, kurtosis, maximum permissible average daily concentration (MPCad), urban ecosystem, Odesa.



Постановка проблеми. Високий рівень антропогенного тиску на повітряне середовище Одеси зумовлений її статусом потужного індустріального центру, густонаселеної агломерації та ключового транспортно-логістичного вузла. Маючи населення понад 1 мільйон мешканців та щільність міської забудови на рівні 6226,6 осіб/км² (що позиціонує місто серед лідерів в Україні) [1], Одеса характеризується складною екологічною ситуацією. Вона формується під впливом численних стаціонарних об'єктів та прогресуючої автомобілізації. Одним з головних деструктивних чинників є наявність діоксиду азоту (NO_2) – токсикант 3-го класу небезпеки, чий вміст в атмосферному повітрі регулярно фіксується з перевищенням встановленого середньодобового санітарно-гігієнічного нормативу ($ГДК_{сд} = 0,04$ мг/м³).

Актуальність дослідження. Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю об'єктивної оцінки сучасного стану повітряного середовища на основі високоточних статистичних методів, що дозволяє виявити приховані тренди та локалізувати зони максимального техногенного ризику.

Мета роботи. Проведення комплексного статистичного аналізу та оцінки просторово-часової динаміки вмісту діоксиду азоту в атмосферному повітрі м. Одеса на основі даних державного моніторингу за станом атмосферного повітря за п'ятирічний період (2017–2021 рр.).

Методи дослідження. Методологія дослідження базувалася на статистичній обробці даних, що включала перевірку однорідності сукупності та розрахунок базових показників. Для розрахунку статистичних оцінок моментів розподілу рядів використовувався програмний комплекс STATISTICA [2].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в рамках пріоритетного наукового напрямку діяльності кафедри екологічного права і контролю Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова [3–9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи літературні джерела з питань забруднення атмосферного повітря [5–6, 8–15] можна стверджувати, що рівень урбанізації в Україні, що досяг 69,7% у 2022 році, зумовлює критичну концентрацію промислових та транспортних вузлів, створюючи аномальний тиск на атмосферну безпеку.

Моніторинг атмосферного повітря є базовим елементом забезпечення стійкості урбосистем та збереження громадського здоров'я. Синергетичний ефект високої щільності населення, інтенсивної забудови та концентрації техногенного навантаження масштабує локальні екологічні експеси до рівня загальноміських загроз. Основним деструктивним чинником виступає автотранспорт, чий емісії акумулюються у приземному шарі атмосфери під впливом термічних бар'єрів «теплових островів». Додатковим кри-

тичним фактором дестабілізації екологічної безпеки стала військова агресія РФ. Вона спровокувала як пряме пірогенне забруднення, так і гострий дефіцит оперативних моніторингових даних. За таких умов нівелювання воєнно-техногенних викликів потребує імплементації стратегії превентивного екологічного менеджменту на основі верифікованих наукових параметрів.

Результати досліджень. В даному дослідженні, нами було опрацьовано ряди строкових вимірювань концентрацій забруднювальних речовин, отримані на пунктах спостереження за забрудненням атмосферного повітря міста Одеса протягом 2017–2021 років. Згідно методології дослідження, вихідна інформація була перевірена на однорідність, сформовано середньомісячні ряди концентрацій забруднювальної речовини. На основі цих рядів були побудовані графіки середньомісячних концентрацій діоксиду азоту (мг/м³) на ПСЗ м. Одеса (рис. 1). Результати спостережень свідчать про високий ступінь синхронності динаміки вмісту діоксиду азоту. Водночас зафіксовано тенденцію до латентного зниження концентрацій зазначеної домішки в атмосферному повітрі.

У таблиці 1 систематизовано результати розрахунку статистичних параметрів розподілу середньомісячних концентрацій діоксиду азоту на постах спостереження за забрудненням м. Одеса. На основі їх компаративного аналізу встановлено такі закономірності:

- мінімальний рівень антропогенного навантаження притаманний ПСЗ № 8, де зафіксовано найнижче математичне сподівання ($\bar{x} = 0,035$ мг/м³). Формування мінімальних концентрацій NO_2 у цій локації обумовлене її просторовою ізоляцією від потужних промислових джерел та магістральних автошляхів із високою інтенсивністю транспортних потоків;

- максимальні показники акумуляції поллютанту характерні для ПСЗ № 18, 16 та 10. Зокрема, на ПСЗ № 18 експериментально визначено найвищу середню концентрацію ($\bar{x} = 0,066$ мг/м³) та екстремальний максимум $x_{max} = 0,078$ мг/м³). На постах № 10, 15 і 16 також простежується хронічно високий рівень середніх концентрацій, що перевищує порогове значення (понд 0,061 мг/м³);

- показники середнього квадратичного відхилення (S_x) за всіма постами спостереження характеризуються низькою амплітудою варіації та однорідністю, перебуваючи в діапазоні 0,0055–0,0069 мг/м³;

- одержані значення свідчать про стаціонарний характер забруднення атмосферного повітря діоксидом азоту в межах кожної локації. Відсутність експресивних стохастичних коливань у міжмісячній динаміці вказує на формування індивідуального стабільного рівня техногенного навантаження для кожного ПСЗ;

- відсутність моди (Mo) верифікує континуальний характер трансформації концентрацій

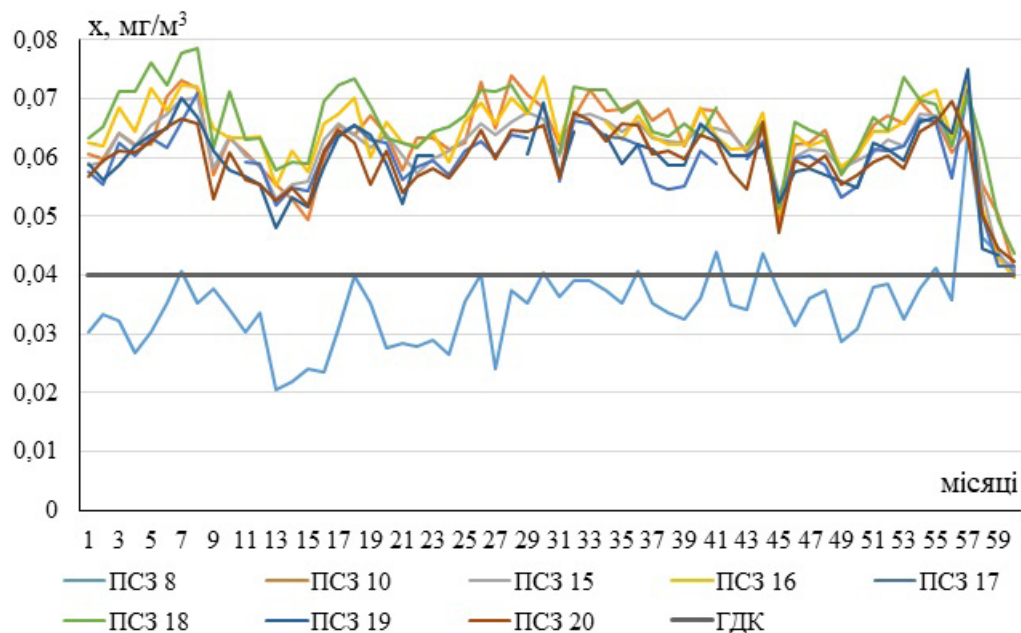


Рис. 1. Ряди середньомісячних концентрацій діоксиду азоту (мг/м³) на ПСЗ м. Одеса. 2017–2021 рр.

Таблиця 1

Статистичні моменти розподілу середньомісячної концентрації діоксиду азоту (мг/м³) на ПСЗ м. Одеса (2017–2021 рр.)

ПСЗ№	n	x_{min}	x_{max}	$\bar{x}$	S_x	As	E
8	60	0,020395	0,064096	0,034821	0,006867	0,99	4,57
10	60	0,041073	0,073898	0,063207	0,006323	-1,04	1,87
15	60	0,041233	0,072864	0,061981	0,005496	-1,54	4,33
16	59	0,039538	0,073582	0,063800	0,006370	-1,62	4,28
17	56	0,041544	0,071508	0,059592	0,005713	-0,94	2,2
18	58	0,043558	0,078529	0,065938	0,006482	-0,91	1,97
19	53	0,043294	0,075105	0,059888	0,005887	-0,46	1,34
20	60	0,042188	0,069571	0,059644	0,005589	-0,91	1,07

поллютанта, детермінований комплексною дією метеорологічних чинників (швидкість і напрямок вітру, температурний режим, явища температурної інверсії) та флуктуаціями інтенсивності емісії викидів;

– ПСЗ № 8 вирізняється правосторонньою асиметрією ($As=0,99$) та високим ексцесом ($E=4,57$). У межах цього відносно референтного («чистого») поста протягом більшої частини річного циклу утримуються низькі значення вмісту NO_2 . Проте високий ексцес у поєднанні з подовженою правою асимптотою розподілу фіксує наявність низькочастотних, але інтенсивних екстремальних сплесків забруднення, зумовлених несприятливими метеорологічними умовами розсіювання (термічна інверсія, штиль) або сезонним зростанням автотранспортного навантаження;

– ПСЗ № 15, 16, 10, 18, 20 характеризуються від'ємною (лівосторонньою) асиметрією (від -0,46 до -1,62), що свідчить про зміщення модального інтервалу розподілу в зону високих значень. Це підтверджує хронічно високий рівень контамінації повітряного басейну, де мінімальні концентрації мають характер аномальних флуктуацій. Найбільш критична екологічна ситуація ідентифікована на ПСЗ № 15 ($As=-1,54$, $E=4,33$) та ПСЗ № 16 ($As=-1,62$, $E=4,28$), де спостерігається ефект акумуляції та пролонгованої фіксації концентрацій на критичних рівнях із подальшим стрімким градієнтом спаду, що визначає стан нормативного очищення повітря як репрезентативний виняток.

Порівняльний аналіз одержаних результатів із чинними санітарно-гігієнічними нормативами дає змогу диференціювати дві полярні екологічні ситу-

ації в зоні моніторингу. Локація ПСЗ № 8 характеризується відносно сприятливим аерохімічним режимом із дискретними епізодами ексцесивного забруднення. Натомість кластер постів № 10–20 (із пролонгованою амплітудою на ПСЗ № 15, 16, 18) репрезентує персистентно деструктивний екологічний стан із високим рівнем акумуляції діоксиду азоту, за якого потенціал природного самоочищення атмосфери є недостатнім.

ПСЗ № 8 є єдиним пунктом спостереження, де екологічна ситуація ідентифікується як умовно стабільна, проте з наявними ознаками потенційного екологічного ризику. Розраховане середнє значення становить $0,034821 \text{ мг/м}^3$, що не перевищує нормативний поріг і становить приблизно 87% від середньодобової гранично допустимої концентрації (ГДК_{сд}). Отже, інтегральний екологічний фон у цій локації відповідає критеріям допустимого. Мінімальне зафіксоване значення знижується до $0,020395 \text{ мг/м}^3$ (удвічі менше за ГДК_{сд}), що верифікує періоди релаксації атмосферного повітря. Водночас максимальний показник досягає $0,064096 \text{ мг/м}^3$, що перевищує межу ГДК_{сд} у 1,6 раза.

Кластер постів № 10–20 перебуває в стані хронічного критичного антропогенного навантаження. Середні величини концентрацій на всіх об'єктах цієї групи суттєво перевищують нормативні ліміти. Найвищий рівень екологічного напруження зафіксовано на ПСЗ № 18, де середній показник перевищує ГДК_{сд} у 1,65 раза. Навіть на найменш забрудненому пості цієї групи (ПСЗ № 17) середня концентрація становить $0,059592 \text{ мг/м}^3$, що перевищує норматив в 1,5 раза.

Констатовано, що навіть у періоди максимальної інтенсифікації процесів самоочищення повітряного басейну, вміст діоксиду азоту практично не опускається нижче референтного ліміту. На ПСЗ № 10, 15, 17, 20 мінімальні екстремуми локалізуються на рівні ГДК_{сд} ($0,041\text{--}0,042 \text{ мг/м}^3$), а на ПСЗ № 18 навіть абсолютний мінімум ($0,043558 \text{ мг/м}^3$) перевищує норму. Це підтверджує безперервний та хронічний характер забруднення.

Максимальні концентрації в межах зазначеного кластера сягають діапазону $0,069\text{--}0,078 \text{ мг/м}^3$, що еквівалентно майже двократному перевищенню ГДК_{сд} (зокрема, для ПСЗ № 18 коефіцієнт кратності перевищення становить 1,96).

В ході дослідження були побудовані гістограми емпіричного розподілу середньомісячних концентрацій досліджуваної домішки на постах спостереження міста.

Розраховані статистичні параметри рядів середньомісячних концентрацій та побудовані емпіричні

гістограми розподілу дають змогу констатувати, що в середньому по місту найбільш імовірні модальні значення вмісту діоксиду азоту локалізуються в діапазоні від $0,05$ до $0,07 \text{ мг/м}^3$, що еквівалентно $1,25\text{--}1,75 \text{ ГДК}_{\text{сд}}$.

Окремого наукового аналізу потребує часовий ряд концентрацій, зафіксованих на ПСЗ № 8. Упродовж досліджуваного періоду (2017–2021 рр.) рівень контамінації атмосферного повітря діоксидом азоту в районі розташування цього поста переважно не перевищував встановлений санітарно-гігієнічний норматив. Проте, на відміну від решти пунктів спостереження, для ПСЗ № 8 ідентифіковано стійку тенденцію до зростання експериментальних значень концентрацій протягом усього ретроспективного періоду дослідження.

Висновки. Низька варіація показників S_x верифікує хронічний характер та стабільний рівень індивідуального техногенного навантаження NO_2 на атмосферу міста.

Виявлено полярність між референтною зоною (ПСЗ № 8; $\bar{x} = 0,87 \text{ ГДК}_{\text{сд}}$) та деструктивним промислово-транспортним кластером (ПСЗ № 10–20; перевищення ГДК_{сд} в $1,5\text{--}1,65$ раза).

Від'ємна асиметрія за більшістю ПСЗ доводить персистентну акумуляцію полютанта у високих діапазонах, визначаючи стан нормативної чистоти повітря як аномальний виняток.

На тлі загального латентного зниження концентрацій NO_2 по місту, на ПСЗ № 8 ідентифіковано стійкий аптренд, що фіксує експансію техногенного тиску на рекреаційні зони.

Максимальний рівень контамінації притаманний ПСЗ № 18, де екстремуми досягають $1,96 \text{ ГДК}_{\text{сд}}$, а мінімальні значення стабільно перевищують санітарний норматив.

Перспективи використання результатів дослідження. З нашої точки зору, наукові положення та прикладні висновки дослідження можуть бути безпосередньо імплементовані в діяльність органів місцевого самоврядування, суб'єктів державного екологічного моніторингу та природоохоронних установ. Прогностичний потенціал та аналітичні дані роботи слугуватимуть підґрунтям для модернізації локальних систем екологічного контролю та оптимізації мережі моніторингу атмосферного повітря, розроблення науково обґрунтованих схем реорганізації міських транспортних потоків з метою зниження логістичного навантаження, стратегічного планування та верифікації комплексних природоохоронних заходів у межах урбанізованих територій.

Література

1. Сайт Головного управління статистики в Одеській області. Населення та міграція. URL: http://od.ukrstat.gov.ua/arh/demogr/demogr1_10_2021.htm.
2. Фетісов В.С. Пакет статистичного аналізу даних STATISTICA: навчальний посібник. Ніжин. НДУ ім. М. Гоголя. 2018. 114 с.
3. Лосева І.Д., Снісаренко В.В. Часові зміни концентрації діоксиду азоту в атмосферному повітрі м. Одеса. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Географічні науки*. 2017. Вип 7. С. 173-178.
4. Просторово-часова оцінка і діагноз стану забруднення атмосферного повітря м. Одеса. Звіт про науково-дослідну роботу. № держреєстрації 0117U002426. Одеса. ОДЕКУ. 2020 р. 115 с.
5. Владимирова О.Г., Бургаз О.А., Тимошук М.О. Особливості забруднення атмосферного повітря м. Одеси діоксидом сірки й оксидом вуглецю. *Екологічні науки*. 2021. № 7 (34). С. 44-50.
6. Бургаз О.А., Самойленко В.О. Щодо питань здійснення державного екологічного моніторингу атмосферного повітря міста Одеса. *Матеріали Третьої Всеукраїнської науково-практичної конференції «Євроінтеграція екологічної політики України»*. Одеса. ОДЕКУ. 2021. С. 101-104.
7. Дослідження відповідності значення ІЗА екологічному стану атмосферного повітря міста. Звіт про науково-дослідну роботу (проміжний). Одеса. ОДЕКУ. 2023 р. 56 с.
8. Бургаз О.А., Гарабазій Т.А., Тимошук М.О. Огляд стану забруднення атмосферного повітря міста Одеса за даними маршрутних спостережень. *Екологічні науки*. 2024. № 4(55). С. 16-21. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.2>
9. Бургаз О.А., Тимошук М.О. Особливості забруднення атмосферного повітря міста Одеса фенолом. *Nature conservation as an essential prerequisite for preserving humanity: International scientific conference*. Riga, Latvia. Baltija Publishing. 2025. P. 33-36. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-541-9-7>
10. Савенець М.В., Дворецька І.В., Козленко Т.В., Комісар К.М., Уманець А.П., Жемера Н.С. Стан забруднення атмосферного повітря в Україні напередодні повномасштабного російського вторгнення. Частина 1: приземний вміст забруднюючих речовин. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. № 31. С. 69-87.
11. Белоконь К., Пірогова І., Мальований М., Тарабан Є. Оцінка якості атмосферного повітря міста Запоріжжя. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. № 3, С. 39-48, DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-4-6>.
12. Мільович С.С., Галла-Бобик С.В., Ченчак М.М. Динаміка зміни стану атмосферного повітря тилового міста (на прикладі м. Львова). *Екологічні науки*. 2026. № 1(64). С. 40-45. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.5>
13. Степова О.В., Корнішина А.О., Трістан А.В. Аналіз забруднення атмосферного повітря від автомобільного транспорту (на прикладі Шевченківського району м. Полтава). *Екологічні науки*. 2022. № 5(44). С. 18-25. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.2>
14. Савенець, М., Надточій, Л., Козленко, Т., Комісар, К., Уманець, А., Грама, Д., Жемера, Н., Крайник, С., Рудас, М. Оціночний звіт: Наслідки повномасштабного російського вторгнення для якості атмосферного повітря в Україні (24.02.2022–24.02.2026). Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. 2026. 51 с.
15. Кузик А.Д., Думас І.З., Олійник О.Т. Забруднення атмосферного повітря автомобільним транспортом на в'їздах до м. Львова. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. № 29. С. 12-23. DOI [10.32447/20784643.29.2024.02](https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.02).

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026