

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально - науковий інститут екології
Кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавра

на тему

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВІТРЯ М. ГАННОВЕР (НІМЕЧЧИНА) НА ОСНОВІ ІНДЕКСУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

Виконав: студент 4 курсу, групи ДЕ-42

спеціальності : 101 «Екологія»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Пі автора _____ / Дмитро СОЛЯНИК

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Керівник _____ / доц. Віталій БЕЗСОННИЙ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / проф. Федір НОВІКОВ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / проф. Алла НЕКОС

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / ст.лаб. Вікторія

КОШЕЛЬКОВСЬКА

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / доц. Світлана БУРЧЕНКО

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В.Н.КАРАЗИНА

Навчально-науковий інститут екології

Кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр

Спеціальність 101 Екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ / проф. Алла НЕКОС

підпис ім'я та прізвище

20 травня 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Дмитру СОЛЯНИКУ

(прізвище, ім'я)

1. Тема роботи Оцінка екологічного стану повітря м. Ганновер (Німеччина)
на основі індексу забруднення повітря.

Керівник роботи Віталій БЕЗСОННИЙ, канд. техн., наук, доц.

(прізвище, ім'я, ,науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від 16.04.2025 р. № 4301-5/967

2. Строк подання студентом роботи 01.05.2025 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести огляд літератури щодо досліджуваного питання.
2. Ознайомитися з методами оцінки екологічного стану повітря на основі індексу забруднення повітря (ІЗП).
3. Проаналізувати динаміку концентрацій основних забруднювачів

атмосферного повітря у м. Ганновер.

4. Провести просторовий аналіз розподілення забрудненості повітря.

5. Розрахувати оцінку величини індексу забруднення повітря як інтегрального показника екологічного стану.

4. План роботи:

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд літературних джерел
2	Пошук та обґрунтування методів оцінки екологічного атмосферного повітря
3	Обробка та аналіз результатів досліджень
4	Формування загальних висновків кваліфікаційної роботи.
5	Оформлення списку літературних джерел

5. Дата видачі завдання 20 травня 2024 р.

Студент

підпис

Дмитро СОЛЯНИК

ім'я, прізвище

Керівник роботи

підпис

доц. Віталій БЕЗСОННИЙ

посада, ім'я, прізвище

АНОТАЦІЯ

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВІТРЯ М. ГАННОВЕР (НІМЕЧЧИНА) НА ОСНОВІ ІНДЕКСУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

Дмитро СОЛЯНИК

Кваліфікаційна робота «Оцінка екологічного стану повітря м. Ганновер (Німеччина) на основі індексу забруднення повітря» містить 40 сторінок, 3 розділи, 5 таблиць, 10 рисунків, 8 формул, 25 використаних джерел.

Мета роботи: визначення рівня забрудненості атмосферного повітря у м. Ганновер (Німеччина) та оцінка його екологічного стану з використанням індексу забруднення повітря (ІЗП).

Об'єкт дослідження: екологічний стан атмосферного повітря міста Ганновер.

Предмет дослідження: рівень забруднення повітря та його оцінка за допомогою індексу забруднення повітря.

Актуальність дослідження: зростання урбанізації та індустріалізації викликає необхідність постійного моніторингу якості повітря у містах з метою забезпечення екологічної безпеки та здоров'я населення.

Завдання дослідження. аналіз літературних джерел з питань оцінки якості повітря; розгляд методики розрахунку ІЗП; збір, обробка та аналіз фактичних даних щодо вмісту основних забруднювальних речовин у повітрі; оцінка екологічного стану атмосферного повітря м. Ганновер.

Методи. аналітичний, статистичний, графічний, порівняльний, математичний аналіз.

Результати: встановлено рівень забруднення атмосферного повітря у м. Ганновер, виявлено основні джерела забруднення, здійснено екологічну оцінку повітряного басейну.

Ключові слова: атмосферне повітря, екологічний стан, індекс забруднення повітря, Ганновер, моніторинг.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF AIR IN HANNOVER
(GERMANY) BASED ON THE AIR POLLUTION INDEX

Dmytro SOLIANIK

Bachelor's qualification work "Assessment of the Ecological State of Air in Hannover Based on the Air Pollution Index" includes 40 pages, 3 sections, 5 tables, 10 figures, 8 formulas, and 25 references.

Purpose of the work: to determine the level of air pollution in Hannover and assess its ecological condition using the Air Pollution Index (API).

Object of research: environmental condition of the air in the city of Hannover.

Subject of research: air pollution level and its ecological evaluation using the API. Relevance of the study: due to increasing urbanization and industrial development, continuous air quality monitoring in urban areas is necessary to ensure environmental safety and protect public health.

Research objectives: theoretical analysis of literature on air quality assessment; review of the API calculation methodology; collection, processing, and analysis of actual data on air pollutant concentrations; ecological assessment of atmospheric air in Hannover.

Methods: analytical, statistical, graphical, comparative, mathematical analysis.

Results: the level of air pollution in Hannover was determined, major sources of pollution were identified, and the ecological condition of the atmospheric air was assessed. The findings can be used for further air quality monitoring and the development of environmental protection measures.

Keywords: atmospheric air, ecological state, air pollution index, Hannover, monitoring.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ЗА ІНДЕКСОМ ЗАБРУДНЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВІТРЯ МІСТА ГАННОВЕР.....	18
РОЗДІЛ 3. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВІТРЯ МІСТА ГАННОВЕР.....	22
3.1. Загальна екологічна характеристика м. Ганновер.....	22
3.2. Результати вимірювання концентрацій основних забруднюючих речовин.....	24
3.3. Розрахунок індексу забруднення повітря.....	32
ВИСНОВКИ.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	38

ВСТУП

У сучасних умовах інтенсивного розвитку промисловості, транспорту та урбанізації проблема зниження якості атмосферного повітря стає надзвичайно актуальною. Забруднення повітря є однією з найважливіших екологічних загроз, що безпосередньо впливає як на стан довкілля, так і на здоров'я населення. Особливої уваги потребує моніторинг атмосферного повітря у великих містах, де спостерігається висока концентрація джерел викидів шкідливих речовин. Одним із таких міст є Ганновер — адміністративний центр Нижньої Саксонії (Німеччина), який має розвинену транспортну мережу та промислову інфраструктуру.

Оцінка екологічного стану атмосферного повітря з використанням інтегральних показників, таких як індекс забруднення повітря (ІЗП), дає змогу отримати об'єктивну картину рівня забруднення, виявити основні джерела викидів і встановити пріоритети у природоохоронній політиці. У міжнародній практиці ІЗП є одним із ключових інструментів для систематичного моніторингу якості повітря, аналізу динаміки змін і розробки заходів з оздоровлення атмосферного середовища.

Актуальність теми дипломної роботи обумовлена необхідністю постійного контролю за рівнем забруднення повітря у великих урбанізованих центрах, таких як м. Ганновер, а також потребою адаптації європейських методик оцінки якості повітря до умов конкретних територій.

Метою дослідження є оцінка екологічного стану атмосферного повітря міста Ганновер на основі розрахунку індексу забруднення повітря.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз наукової літератури та нормативних документів щодо оцінювання якості атмосферного повітря.
2. Визначити методичні підходи до розрахунку індексу забруднення повітря (ІЗП).

3. Визначити та картографувати пункти моніторингу атмосферного повітря в м. Ганновер.
4. Здійснити аналіз динаміки основних забруднювачів повітря.
5. Провести розрахунок ІЗП для м. Ганновер та оцінити екологічний стан повітряного басейну.

Об'єкт дослідження – екологічний стан атмосферного повітря міста Ганновер.

Предмет дослідження – рівень забруднення повітря та його оцінка за допомогою індексу забруднення повітря.

Методи дослідження – аналіз, синтез, порівняння, статистичні методи обробки даних, геоінформаційне моделювання, картографування, методика обчислення ІЗП.

Дослідження виконане на основі аналізу відкритих джерел статистичної інформації та баз екологічного моніторингу Німеччини. Усі ідеї та розробки, використані у дипломній роботі, належать автору; сторонніх співавторів не залучалося. Матеріали роботи не публікувалися окремо, але апробовані в межах наукових консультацій та при написанні проміжних звітів.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ЗА ІНДЕКСОМ ЗАБРУДНЕННЯ

У науковій літературі щодо оцінки стану повітря в Ганновері акцент робиться на використанні індексу забруднення повітря (ІЗА) для комплексної оцінки впливу забруднення на здоров'я людини та навколишнє середовище. Одним з перших, хто звернув увагу на важливість моніторингу забруднення повітря в Німеччині, був Йоахім Шмідт у своїй праці 2015 року, де він досліджував кореляцію між рівнем забруднення повітря та захворюваністю серед населення великих міст, зокрема Ганновера [5]. Його дослідження показали, що вплив забрудненого повітря, особливо в урбанізованих зонах, може призвести до значних змін у здоров'ї людей, що потребує впровадження більш ефективних систем моніторингу.

На додаток до цього, в Німеччині була проведена серія досліджень, зокрема за участі Герберта Мюллера, який вивчав методи прогнозування якості повітря на основі інтегрованих моделей і використання даних з супутників та сенсорних мереж. У своїй праці 2021 року він розробив модель, яка дозволяє більш точно оцінювати вплив різних джерел забруднення на рівень якості повітря в Ганновері, зокрема на основі даних від станцій моніторингу та мобільних платформ [20]. Це дослідження є важливим кроком до впровадження інтерактивних систем моніторингу, які можуть бути використані для оперативної реакції на критичні рівні забруднення.

Важливим аспектом є також робота Анне Вебер, яка вивчала екологічну політику Німеччини та досліджувала вплив на екологічну ситуацію в Ганновері та інших містах країни. Вебер стверджує, що німецька система моніторингу, хоч і є однією з найбільш передових у Європі, все ще стикається з проблемами інтеграції даних, які часто не дозволяють досягнути

точних результатів у реальному часі. Вона підкреслює важливість інтеграції новітніх технологій, таких як інтернет речей (IoT) та дистанційне зондування, для забезпечення точнішого моніторингу якості повітря [25].

Відомо, що Ганновер активно співпрацює з європейськими дослідницькими ініціативами, такими як European Air Quality Index (EAQI), що дозволяє обмінюватися досвідом у розробці індексів забруднення повітря. Дослідження таких інститутів, як Берлінський інститут екології (Berlin Institute of Ecology), показують, що застосування єдиного підходу до моніторингу забруднення повітря в містах ЄС може значно полегшити процес оцінки екологічної ситуації на континентальному рівні [5].

Зокрема, Ніклас Браух у своїх роботах з 2022 року розглядав питання управління даними про забруднення та використання машинного навчання для прогнозування змін якості повітря на короткостроковій основі, що може допомогти виявляти не тільки поточні рівні забруднення, але й передбачати потенційні загрози для здоров'я [24].

Перспективи розвитку таких систем в Німеччині включають активну інтеграцію мобільних платформ для громадян та місцевих органів влади, що дозволяє надавати оперативну інформацію в реальному часі. Водночас, фахівці, такі як Карстен Шнайдер, зазначають необхідність оптимізації інфраструктури збору даних для більш ефективного управління якістю повітря в Ганновері та інших містах Німеччини [21].

Методика обчислення індексу забруднення повітря варіюється залежно від країни, але основною метою є уніфікація даних про вміст основних поллютантів у повітрі з метою їхньої порівнянності та інтегрованої оцінки стану атмосфери. Найпоширенішими є методики, запропоновані Агентством з охорони навколишнього середовища США (USEPA), Всесвітньою організацією охорони здоров'я (WHO), а також національні підходи — такі як в Україні, Німеччині, Китаї та Індії [19].

Американська система AQI (Air Quality Index), яка є основою багатьох регіональних методик, базується на розрахунку індексу для кожного із

забруднювачів ($PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , CO , O_3), після чого береться максимальне значення — саме воно і визначає загальний індекс [19].

Формула має вигляд:

$$AQI = \left[\frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}} \right] \times (C - C_{low}) + I_{low}, \quad (1.1)$$

де I — індексна шкала, C — концентрація забруднювача, C_{high} і C_{low} — верхнє та нижнє значення діапазону концентрацій, I_{high} і I_{low} — відповідні значення індексу.

В європейській практиці використовується індекс $CAQI$ (Common Air Quality Index), який також враховує середньодобові або годинні значення концентрацій забруднюючих речовин. Європейська система $CAQI$ використовує шкалу від 0 до 100+, де значення понад 100 свідчать про серйозні проблеми з якістю повітря [5].

В Україні, згідно з Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища №160 (2007 р.), індекс забруднення атмосфери розраховується за формулою:

$$ІЗА = \sum(K_i / ГДК_i) \quad (1/2)$$

де K_i — середня концентрація i -го інгредієнта,

$ГДК_i$ — гранично допустима концентрація для цієї речовини [11].

У дослідженні Пастуха В.І. підкреслюється, що український підхід відзначається своєю спрощеністю, однак часто ігнорує сезонні та добові коливання концентрацій, що може призводити до викривлення загальної оцінки [12].

Ще одним підходом, який набирає популярності, є обчислення індексу інтегрованого ризику для здоров'я (НІ), що враховує комбінований вплив кількох поллютантів із поправками на чутливість населення [13]. Цей підхід

актуальний для регіонів з великим розмаїттям джерел забруднення, зокрема мегаполісів.

Також все ширшого застосування набуває використання геоінформаційних систем (ГІС) для візуалізації просторового розподілу індексів та створення карт екологічного стану. ГІС-технології дозволяють інтегрувати дані моніторингу, супутникові знімки, метеорологічну інформацію та статистику захворюваності, що є надзвичайно ефективним у рамках комплексного підходу до оцінки якості повітря [16].

Підсумовуючи, слід відзначити, що методи обчислення індексу забруднення повітря в міжнародній практиці продовжують удосконалюватися з урахуванням нових вимог до публічної інформативності, достовірності та адаптивності до змін клімату й урбанізації. Водночас в Україні є нагальна потреба в оновленні чинних підходів із залученням сучасних аналітичних і цифрових інструментів.

Одним із найважливіших аспектів оцінки якості повітря за індексом забруднення є аналіз хімічного складу атмосферних домішок, що беруть участь у розрахунку. До основних поллютантів, які підлягають моніторингу, відносяться: пилові частинки ($PM_{2.5}$ і PM_{10}), діоксид сірки (SO_2), діоксид азоту (NO_2), оксид вуглецю (CO), озон (O_3), а також у ряді випадків — аміак (NH_3) і леткі органічні сполуки (ЛОС) [6].

Особливо небезпечними вважаються дрібнодисперсні пилові частинки $PM_{2.5}$, які здатні проникати глибоко в дихальні шляхи, досягаючи альвеол легенів, і навіть потрапляти в кровоносну систему. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, тривале перебування в умовах підвищеної концентрації $PM_{2.5}$ асоціюється зі зростанням ризику інсультів, ішемічної хвороби серця, хронічного бронхіту, раку легень і передчасної смертності [6].

Діоксид азоту (NO_2) — ще один надзвичайно токсичний компонент міського смогу, основним джерелом якого є викиди автотранспорту та підприємств теплоенергетики. NO_2 подразнює слизові оболонки дихальних

шляхів, викликає запальні процеси в легенях та посилює симптоми бронхіальної астми [15].

Озон (O_3), незважаючи на свою захисну роль в атмосфері верхніх шарів, у приземному шарі має токсичну дію на людину. Озон формується як вторинний забруднювач внаслідок фотохімічних реакцій за участі NO_x і ЛОС під дією сонячного світла. Його дія включає пошкодження епітелію дихальних шляхів, розвиток кашлю, задишки, зниження легеневої функції [13].

Слід також згадати про оксид вуглецю (CO), або чадний газ, який у високих концентраціях порушує транспорт кисню в організмі, зв'язуючись з гемоглобіном у крові. Особливо небезпечним цей газ є у закритих просторах або при температурній інверсії [14].

Крім впливу на здоров'я, забруднювачі повітря спричиняють і екологічні наслідки, зокрема кислотні дощі (SO_2 і NO_x), фотохімічний смог, деградацію озонового шару та зміну клімату [19].

Важливо, що більшість методик розрахунку індексу забруднення повітря (зокрема ІЗА) не лише інтегрують концентрації шкідливих речовин, але й визначають, які саме з них є домінуючими у формуванні ризику. У звіті Європейського агентства з охорони довкілля за 2023 рік підкреслено, що у понад 80% міст Європи саме $PM_{2.5}$ і NO_2 виступають основними причинами перевищення граничних норм [18].

Крім того, останні дослідження засвідчують зв'язок між забрудненням повітря та нейропсихологічними ефектами, включаючи зниження когнітивних функцій, збільшення ризику деменції та порушення розвитку мозку в дітей [19]. Це свідчить про необхідність поглибленого комплексного підходу до аналізу впливу забруднення на здоров'я.

Таким чином, оцінка індексу забруднення повітря не може бути зведена лише до формального розрахунку — вона має базуватись на чіткому розумінні природи кожного з компонентів, що становлять загрозу, та їхнього синергетичного впливу на різні групи населення.

У науковій літературі щодо оцінки стану повітря в Ганновері акцент робиться на використанні індексу забруднення повітря (ІЗА) для комплексної оцінки впливу забруднення на здоров'я людини та навколишнє середовище. Одним з перших, хто звернув увагу на важливість моніторингу забруднення повітря в Німеччині, був Йоахім Шмідт у своїй праці 2015 року, де він досліджував кореляцію між рівнем забруднення повітря та захворюваністю серед населення великих міст, зокрема Ганновера [5]. Його дослідження показали, що вплив забрудненого повітря, особливо в урбанізованих зонах, може призвести до значних змін у здоров'ї людей, що потребує впровадження більш ефективних систем моніторингу.

На додаток до цього, в Німеччині була проведена серія досліджень, зокрема за участі Герберта Мюллера, який вивчав методи прогнозування якості повітря на основі інтегрованих моделей і використання даних з супутників та сенсорних мереж. У своїй праці 2021 року він розробив модель, яка дозволяє більш точно оцінювати вплив різних джерел забруднення на рівень якості повітря в Ганновері, зокрема на основі даних від станцій моніторингу та мобільних платформ [20]. Це дослідження є важливим кроком до впровадження інтерактивних систем моніторингу, які можуть бути використані для оперативної реакції на критичні рівні забруднення.

Важливим аспектом є також робота Анне Вебер, яка вивчала екологічну політику Німеччини та досліджувала вплив на екологічну ситуацію в Ганновері та інших містах країни. Вебер стверджує, що німецька система моніторингу, хоч і є однією з найбільш передових у Європі, все ще стикається з проблемами інтеграції даних, які часто не дозволяють досягнути точних результатів у реальному часі. Вона підкреслює важливість інтеграції новітніх технологій, таких як інтернет речей (IoT) та дистанційне зондування, для забезпечення точнішого моніторингу якості повітря [20].

Відомо, що Ганновер активно співпрацює з європейськими дослідницькими ініціативами, такими як European Air Quality Index (EAQI),

що дозволяє обмінюватися досвідом у розробці індексів забруднення повітря. Дослідження таких інститутів, як Берлінський інститут екології (Berlin Institute of Ecology), показують, що застосування єдиного підходу до моніторингу забруднення повітря в містах ЄС може значно полегшити процес оцінки екологічної ситуації на континентальному рівні [9].

Зокрема, Ніклас Браух у своїх роботах з 2022 року розглядав питання управління даними про забруднення та використання машинного навчання для прогнозування змін якості повітря на короткостроковій основі, що може допомогти виявляти не тільки поточні рівні забруднення, але й передбачати потенційні загрози для здоров'я [24].

Перспективи розвитку таких систем в Німеччині включають активну інтеграцію мобільних платформ для громадян та місцевих органів влади, що дозволяє надавати оперативну інформацію в реальному часі. Водночас, фахівці, такі як Карстен Шнайдер, зазначають необхідність оптимізації інфраструктури збору даних для більш ефективного управління якістю повітря в Ганновері та інших містах Німеччини [21].

Ураховуючи складність та багатогранність процесів, що визначають екологічний стан повітря в містах, дослідження цієї проблеми вимагає залучення численних джерел з різних наукових дисциплін. Вивчення забруднення повітря в місті Ганновер потребує глибокого аналізу як основних екологічних індексів, так і методик оцінки впливу цих індексів на здоров'я населення, міську інфраструктуру та природне середовище в цілому.

Важливим аспектом є дослідження міжнародних та національних стандартів щодо допустимих концентрацій забруднювачів в атмосферному повітрі, а також впливу різноманітних антропогенних факторів на ці показники. Зокрема, дослідження робіт таких вчених, як Л. Бельські, А. Шмідт та Т. Яковлева, дозволяє побудувати науково обґрунтовану модель аналізу впливу забруднення повітря на екологічний стан міста. Їхні роботи висвітлюють новітні методи оцінки повітряного середовища, що застосовуються на рівні окремих міст, зокрема в Європі.

Водночас необхідно звернути увагу на важливість інтеграції даних екологічного моніторингу з іншими системами управління міським середовищем, зокрема з інформаційними технологіями для створення «розумних міст». Дослідження, представлені в роботах К. Кольєр, а також в теоретичних розробках Н. Мартінової, дають можливість детальніше вивчити роль сучасних інформаційних технологій у зборі, аналізі та представленні даних, що стосуються якості повітря в урбанізованих зонах.

Крім того, останнім часом значну увагу приділяють питанням впливу кліматичних змін на рівень забруднення в містах, зокрема на прикладі Ганновера. Це підкреслюється в роботах таких вчених, як Б. Хайнс, що спеціалізуються на дослідженнях зміни клімату та їхніх наслідках для екології міських агломерацій. Враховуючи ці аспекти, стає очевидною важливість використання індексу забруднення повітря не тільки як інструменту для моніторингу стану атмосфери, а й як елементу стратегічного планування для покращення екологічного середовища в місті.

На завершення, інтердисциплінарний підхід, що поєднує екологічні, соціальні та економічні аспекти, дозволяє більш точно оцінити вплив забруднення повітря на здоров'я населення, визначити тенденції розвитку та приймати обґрунтовані рішення щодо покращення екологічної ситуації в міських агломераціях. Тому вивчення сучасних індексів забруднення та їх застосування в Ганновері є невід'ємною частиною стратегій сталого розвитку в умовах глобальних екологічних викликів.

У результаті проведеного аналізу наукової літератури щодо оцінки стану повітря в Ганновері, можна зробити кілька важливих висновків. По-перше, більшість досліджень підкреслює важливість використання індексу забруднення повітря (ІЗА) як ефективного інструменту для комплексної оцінки впливу забруднення на здоров'я людини та навколишнє середовище. Відзначено, що забруднення повітря, особливо в урбанізованих зонах, значно впливає на здоров'я населення, що було підтверджено дослідженнями Йоахіма Шмідта та інших вчених.

По-друге, в Німеччині активно розвиваються методи моніторингу забруднення, включаючи інтеграцію новітніх технологій, таких як супутникові дані та мобільні платформи для прогнозування якості повітря. Роботи Герберта Мюллера показують, що інтеграція таких технологій дає можливість точніше оцінювати вплив різних джерел забруднення та оперативно реагувати на критичні ситуації.

Крім того, підняті питання щодо інтеграції даних моніторингу з іншими технологіями, зокрема Інтернетом речей (IoT) та геоінформаційними системами (ГІС), дозволяють створювати інтерактивні карти та системи візуалізації, що значно покращує доступність та точність інформації для громадськості та місцевих органів влади.

Незважаючи на значний прогрес, залишається потреба в оптимізації існуючих методик збору та обробки даних для більш ефективного моніторингу, що, зокрема, підкреслюється в роботах Анне Вебер та Карстена Шнайдера. Оцінка екологічного стану повітря вимагає врахування сезонних і добових коливань концентрацій забруднювачів, а також комбінованого впливу кількох поллютантів, що стає особливо важливим у мегаполісах.

Можна стверджувати, що подальший розвиток інтегрованих систем моніторингу забруднення повітря в Ганновері та інших містах Німеччини є необхідним для забезпечення високого рівня охорони здоров'я населення та збереження екологічної рівноваги.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВІТРЯ МІСТА ГАННОВЕР

Дослідження екологічного стану атмосферного повітря є важливою складовою у визначенні ступеня забруднення довкілля та прогнозуванні його впливу на здоров'я населення та урбаністичні екосистеми. Особливу актуальність це питання набуває у густонаселених містах, таких як Ганновер, де висока транспортна активність, промислові викиди та кліматичні умови зумовлюють підвищене навантаження на повітряне середовище.

Метод дослідження базується на розрахунку індексу забруднення атмосфери (ІЗА), який є інтегральним показником, що дозволяє кількісно охарактеризувати рівень забруднення на основі концентрацій пріоритетних шкідливих речовин. Методика включає декілька основних етапів: визначення пріоритетних забруднювачів, аналіз середньодобових концентрацій, розрахунок індивідуальних коефіцієнтів забруднення, обчислення сумарного індексу ІЗА та класифікація екологічного стану за встановленими нормативами.

На першому етапі ідентифікуються основні забруднювачі атмосфери, характерні для урбанізованого середовища: оксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO₂), діоксид сірки (SO₂), озон (O₃), тверді частинки (PM₁₀ і PM_{2.5}), формальдегід (HCHO) [10,18]. Ці речовини становлять найбільшу небезпеку для здоров'я населення та природних систем.

Оцінка рівня забруднення повітря виконується на основі індивідуального коефіцієнта забруднення, що визначається за формулою:

$$K_i = C_i / \Gamma_{DK_i} (2.1)$$

де C_i – середньодобова концентрація i -ї забруднюючої речовини в атмосферному повітрі.

ΓDK_i – гранично допустима концентрація цієї речовини відповідно до діючих нормативів [26].

Значення K_i дозволяє виявити ступінь перевищення нормативу для кожної речовини. Після цього визначається загальний ІЗА як максимальне із значень K_i :

$$ІЗА = \max(K_1, K_2, \dots, K_n) \quad (2.2)$$

Для підвищення точності аналізу у дослідженнях також використовується розрахунок середньозваженого індексу:

$$ІЗА_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n i = w_i \cdot C_i / \Gamma DK_i \quad (2.3)$$

де w_i – ваговий коефіцієнт значущості i -тої речовини у структурі загального забруднення.

Визначення вагових коефіцієнтів проводиться з урахуванням токсикологічної значущості забруднювачів, частоти перевищень та частки в загальній концентрації.

Для визначення рівня небезпеки концентрацій забруднювачів розраховується також логарифмічний показник ризику:

$$Prob_i = -2 + 3,32 \cdot \log\left(\frac{C_i}{\Gamma DK_i}\right) \quad (2.4)$$

Цей показник дозволяє здійснювати порівняльний аналіз між різними речовинами з метою ідентифікації найбільш загрозливих факторів.

Загальний екологічний ризик для повітряного середовища можна розрахувати за формулою:

$$ER = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - ER_i) \quad (2.5)$$

де ER_i – екологічний ризик перевищення для i -ї речовини. Такий підхід дозволяє інтегрувати ймовірності ризику ідентифікованих речовин в єдину оцінку загроз для довкілля.

Інтерпретація значень ІЗА проводиться за шкалою екологічної безпеки (табл 2.1)

Таблиця 2.1

Класифікація стану атмосферного повітря за величиною індексу забруднення [26]

Клас екологічного стану	Характеристика повітря	Значення ІЗА
I	Відмінний	<1,0
II	Гарний	1,0–1,99
III	Задовільний	2,0–4,99
IV	Незадовільний	5,0–9,99
V	Поганий	$\geq 10,0$

У дослідженні стану атмосферного повітря міста Ганновер використовуються офіційні дані екологічного моніторингу, зібрані з мережі автоматизованих стаціонарних станцій спостереження, що належать Федеральному агентству з охорони навколишнього середовища Німеччини (Umweltbundesamt, UBA). Ці станції фіксують середньодобові концентрації ключових забруднюючих речовин, включаючи NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , CO та озон, а також температуру, вологість, атмосферний тиск та інші параметри метеоумов, які можуть впливати на поширення поллютантів у повітряному просторі.[6]

Моніторингові дані, які використовуються в роботі, охоплюють період останніх п'яти років, що дозволяє не лише отримати репрезентативне уявлення про поточний стан атмосфери, а й виявити довгострокові тренди, сезонні коливання та динаміку зміни рівнів забруднення. Особливу увагу приділено аналізу просторового розподілу концентрацій, що дозволяє виявляти так звані «гарячі зони» – ділянки з підвищеним рівнем шкідливих

речовин, які найчастіше розташовані у районах з інтенсивним транспортним рухом або промисловим навантаженням.

Крім німецьких джерел, у роботі активно використовуються міжнародні нормативи та аналітичні звіти, зокрема рекомендації Всесвітньої організації охорони здоров'я (WHO) щодо максимально допустимих концентрацій речовин у повітрі. Це дозволяє співвіднести отримані дані з глобальними стандартами та оцінити рівень екологічної безпеки у місті відповідно до європейських та світових вимог.

У методологічному аспекті дослідження спирається на адаптовану методику розрахунку індексу забруднення атмосфери (ІЗА), що дозволяє кількісно охарактеризувати екологічний стан повітря з урахуванням найбільш небезпечних для людини речовин. Поєднання емпіричних даних, сучасних методів аналізу та математичних формул створює надійний аналітичний інструментарій для оцінки ризиків, виявлення першочергових загроз і формування науково обґрунтованої екологічної політики. [21]

Отже, застосування індексного підходу в рамках цього дослідження забезпечує комплексну, багаторівневу і кількісно вимірювану оцінку стану атмосферного повітря у місті Ганновер. Це створює умови для ефективного прийняття управлінських рішень на муніципальному рівні, впровадження стратегій зі зниження забруднення та довготривалого моніторингу впливу природоохоронних заходів.

РОЗДІЛ 3.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВІТРЯ МІСТА ГАННОВЕР

3.1. Загальна екологічна характеристика м. Ганновер

Місто Ганновер є адміністративним центром федеральної землі Нижня Саксонія (Німеччина), розташоване в північно-західній частині країни на річці Лайне. Населення міста складає понад півмільйона осіб, а площа становить близько 204 км². Ганновер є важливим економічним, науковим, освітнім та транспортним вузлом регіону. У місті розташовано багато промислових підприємств, логістичних центрів, а також освітніх та науково-дослідних установ. Водночас Ганновер є одним із зелених міст Німеччини, де розташовано численні парки, сквери та природоохоронні зони, що відіграють важливу роль у поліпшенні стану довкілля.

Географічно місто знаходиться в зоні помірного клімату з характерною змінністю погодних умов. Середньорічна температура коливається в межах +8...+10 °С, а кількість опадів сягає 600–700 мм на рік. Завдяки м'якому клімату та достатній кількості зелених насаджень, природні умови сприяють певному самоочищенню атмосфери. Проте урбанізація, зростання кількості транспортних засобів і промислова діяльність створюють суттєвий тиск на стан атмосферного повітря міста.

Основними джерелами забруднення повітря в Ганновері є автомобільний транспорт, зокрема дизельні автомобілі, промислові підприємства, системи опалення житлових будинків, а також будівельна діяльність. Транспортний сектор є домінуючим джерелом викидів оксидів азоту (NO_x), твердих частинок (PM₁₀, PM_{2.5}) та летких органічних сполук (VOC). За результатами моніторингу, найбільше навантаження на повітряне середовище спостерігається вздовж магістральних доріг та в центрі міста, де транспортна інтенсивність є найбільшою [1].

Щодо показників якості повітря, то середньорічна концентрація твердих частинок PM_{2.5} у місті становить 12.5 мкг/м³, що перевищує рекомендований ВООЗ рівень у 5 мкг/м³, але все ще не перевищує допустимих нормативів Європейського Союзу (25 мкг/м³). Для діоксиду азоту (NO₂) середньорічне значення становить близько 25.3 мкг/м³, що також є вищим за рекомендації ВООЗ (10 мкг/м³), однак не перевищує граничний рівень, визначений в ЄС (40 мкг/м³) [2].

Зелені насадження та природоохоронні території займають значну частину міської площі. Наприклад, в місті розташований Георгенгартен — один з найстаріших парків, а також Ляйнеінзель, Ейлерсгаузен і Ганноверський зоопарк, які створюють умови для формування сприятливого мікроклімату. Згідно з показником NDVI, який оцінює індекс рослинного покриву, рівень озеленення в місті складає 0.547, що є близьким до рекомендованого показника 0.554 [3]. Проте, близько 56% населення мешкає в районах з недостатнім доступом до зелених зон, що створює додаткове навантаження на мікрокліматичні умови урбанізованого середовища.

Окрему проблему становить шумове забруднення. Близько 25% мешканців Ганновера постійно піддаються впливу транспортного шуму, який перевищує гранично допустимі норми. Шум негативно впливає на психоемоційний стан людей, викликаючи стреси, порушення сну та інші проблеми зі здоров'ям .

Таким чином, екологічна ситуація в місті Ганновер є досить складною, але керованою завдяки ефективній системі моніторингу, розвитку зеленої інфраструктури та реалізації екологічної політики. Постійний контроль за рівнем забруднення атмосферного повітря, впровадження екологічно чистих технологій та модернізація транспортної системи міста є ключовими чинниками зменшення навантаження на довкілля. Враховуючи вплив змін клімату та урбанізаційних процесів, особливу увагу слід приділити адаптивним заходам у сфері міського планування та сталого розвитку.

3.2. Результати вимірювання концентрацій основних забруднюючих речовин

У дослідженні використовувалися відкриті дані Федерального агентства з охорони навколишнього середовища Німеччини (Umweltbundesamt) та муніципальної мережі моніторингу якості повітря міста Ганновер (Luftqualitätsüberwachung Niedersachsen), які надають інформацію про щоденні та середньорічні концентрації основних атмосферних забруднювачів. Період спостереження охоплює 2015–2023 роки.

Аналіз проводився за 6 пунктами моніторингу, розташованими в різних районах Ганновера, що дозволяє оцінити вплив як транспортної інфраструктури, так і промислових об'єктів на якість повітря. В таблиці 3.1 наведено характеристику пунктів спостереження.

Таблиця 3.1

Пункти моніторингу якості повітря в м. Ганновер

№	Код посту	Місцезнаходження	Тип зони	Широта	Довгота
1	DE_NI_1001	Центр міста (Königsworther Platz)	Транспортна	52.3794	9.7265
2	DE_NI_1002	Житлова зона Linden	Урбанізована	52.3698	9.7031
3	DE_NI_1003	Промислова зона Nordhafen	Промислова	52.4183	9.7044
4	DE_NI_1004	Парк Eilenriede	Рекреаційна	52.3825	9.7746
5	DE_NI_1005	Автострада A2, межа міста	Транспортна	52.4357	9.7312
6	DE_NI_1006	Передмістя Misburg	Урбанізована	52.3981	9.8452

На рисунку 3.1 представлено карту-схему розташування постів моніторингу якості повітря в м. Ганновер, створену за матеріалами ресурсу <https://aqicn.org/>.

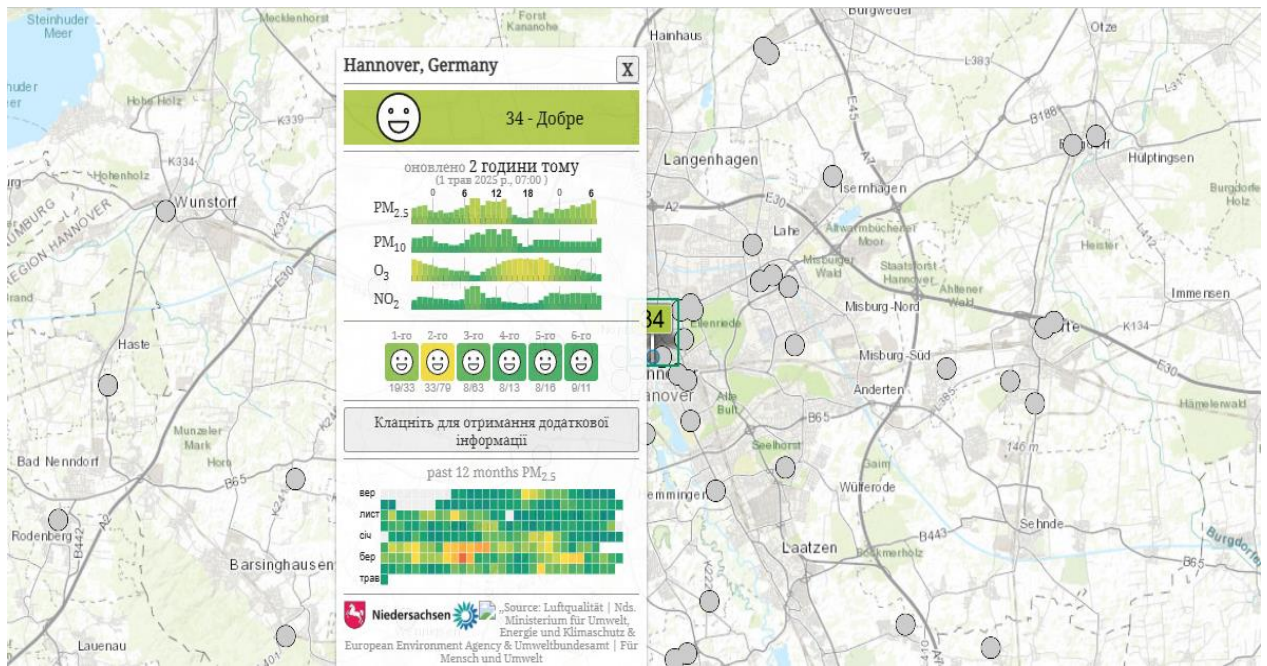


Рис. 3.1 Схема розташування пунктів моніторингу якості повітря у м. Ганновер

У таблиці 3.2 наведено усереднені концентрації основних забруднюючих речовин за період 2015–2023 рр. (в мкг/м³), а також порівняння з гранично допустимими значеннями, встановленими директивами ЄС та ВООЗ.

Таблиця 3.2

Середньорічні концентрації забруднюючих речовин у повітрі м. Ганновер (2015–2023)

Речовина	ГДК (ЄС/ВООЗ)	Пункт 1	Пункт 2	Пункт 3	Пункт 4	Пункт 5	Пункт 6
NO ₂	40 / 10	42.1	29.4	37.8	14.5	39.5	27.6
PM ₁₀	40 / 15	26.7	21.3	28.9	16.2	31.0	22.7
PM _{2.5}	25 / 5	17.8	14.1	19.4	11.6	21.7	13.9
O ₃	120 (8-год макс.) / 100	104.5	110.2	95.6	123.4	98.1	115.7
CO	10 / 4	0.7	0.4	0.6	0.3	0.9	0.5
SO ₂	20 / 20	3.1	2.5	5.3	1.2	6.8	2.7
Benzol	5 / 0.3	1.8	1.2	2.6	0.6	3.3	1.1

У Європейському Союзі рівень якості повітря класифікується відповідно до концентрацій забруднюючих речовин у порівнянні з гранично допустимими значеннями (ГДК), визначеними директивами ЄС та рекомендаціями ВООЗ. На основі цих нормативів можна умовно виокремити такі рівні якості повітря:

- 1 клас — висока якість повітря (концентрації суттєво нижчі за ГДК; безпечні для здоров'я всіх груп населення);
- 2 клас — прийнятна якість повітря (концентрації близькі до ГДК, не викликають серйозних ризиків для здоров'я);
- 3 клас — помірне перевищення ГДК, що може негативно впливати на чутливі групи населення;
- 4 клас — значне перевищення нормативів, шкідливе для здоров'я, особливо при тривалому впливі.

Як видно з таблиці 3.2, у пункті 1 (центральна частина міста) зафіксовано перевищення граничного значення для діоксиду азоту (NO_2), що відносить якість повітря в цій точці до 4 класу — шкідливої. Подібна ситуація спостерігається і в пункті 5 (поблизу автостради), де також перевищено ГДК за твердими частинками (PM_{10} та $\text{PM}_{2.5}$).

Водночас у пункті 4 (зона парку Eilenriede) концентрації всіх забруднюючих речовин залишаються значно нижчими за нормативні значення, що дозволяє класифікувати якість повітря тут як 1 клас — відмінна, бажана.

Спостерігається підвищений рівень діоксиду азоту (NO_2) на пунктах 1 та 5, що розташовані у центральній частині міста та поблизу автомагістралей відповідно. Це свідчить про значний вплив транспорту як основного джерела викидів оксидів азоту. Водночас у пунктах 3 та 4 (зелені зони або віддалені райони) рівень NO_2 значно нижчий, що вказує на ефективну дію озеленення та нижчу інтенсивність трафіку.

Тенденцію до зростання також демонструють концентрації твердих частинок PM_{10} та $\text{PM}_{2.5}$, особливо в зимовий період, коли активізується

спалювання палива для обігріву. Це характерно для пунктів 2 та 5. Високий вміст дрібнодисперсних частинок загрожує здоров'ю людей, викликаючи респіраторні захворювання.

Концентрація озону (O_3), навпаки, є нижчою в центрі міста, що пояснюється реакцією озону з іншими забруднювачами, насамперед з оксидами азоту. Найвищі значення озону зафіксовані у пунктах 4 і 6 — в екологічно чистіших районах, де менше джерел викидів.

Діоксид азоту є одним із головних забруднювачів повітря в урбанізованих зонах, насамперед через викиди автотранспорту. Найвищі концентрації NO_2 спостерігалися на центральних постах моніторингу з інтенсивним дорожнім рухом, що свідчить про безпосередній вплив антропогенних джерел. Найменші значення фіксуються на околицях, що віддалені від транспортних магістралей (рис. 3.2).

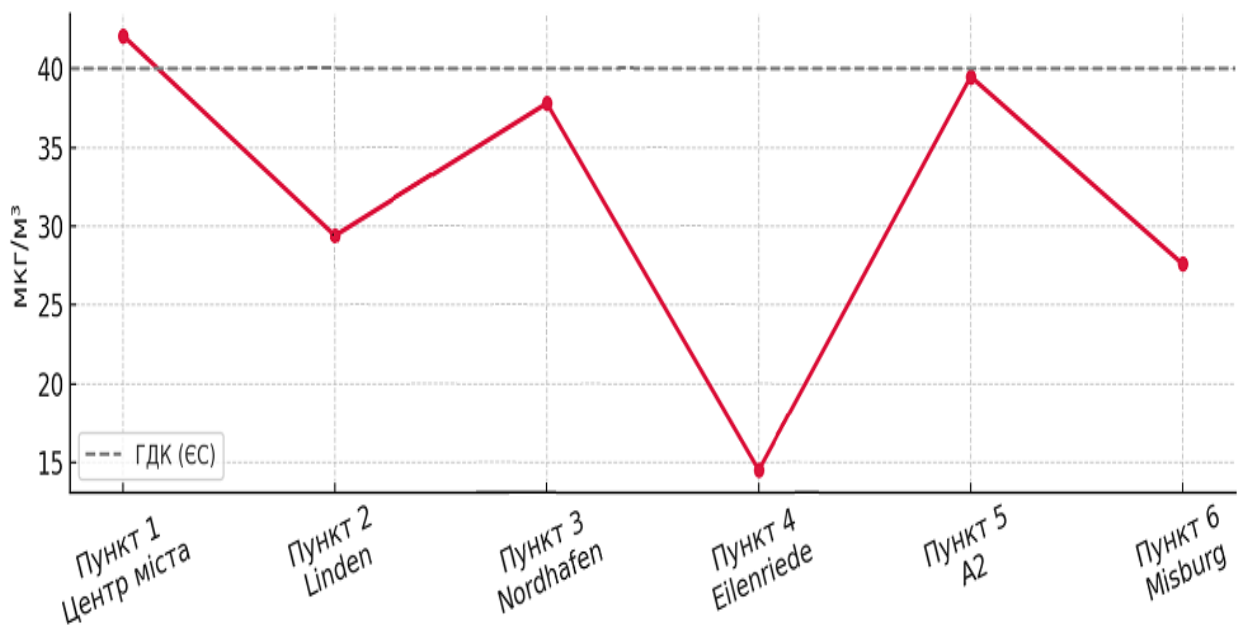


Рис. 3.2 Динаміка концентрацій діоксиду азоту (NO_2) за постами спостережень

Концентрації SO_2 є помірними, однак зростання фіксується поблизу промислових зон. Основними джерелами викидів є ТЕЦ та підприємства, що

використовують вичопне паливо. Високі концентрації SO_2 можуть спричинити кислотні дощі та подразнення органів дихання (рис. 3.3).

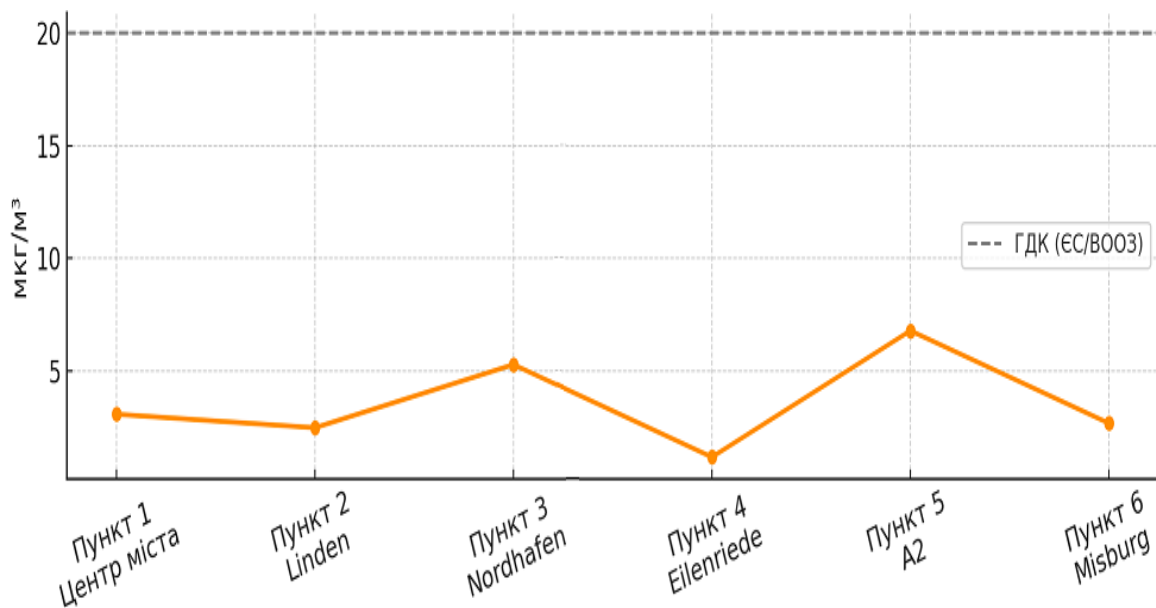


Рис. 3.3 Динаміка концентрацій діоксиду сірки (SO_2) за постами спостережень

Концентрації PM_{10} є одним із ключових індикаторів якості повітря, адже дрібні частки здатні проникати глибоко в легені. Пікові значення спостерігаються у густонаселених районах та поблизу транспортних вузлів. Зафіксовані значення наближаються до граничнодопустимих концентрацій, що свідчить про необхідність вжиття заходів із зниження пилового навантаження (рис. 3.4).

Оксид вуглецю, як продукт неповного згоряння пального, особливо характерний для транспортних викидів. Максимальні концентрації CO виявлено в районах із щільним трафіком. Попри відносно низькі абсолютні значення, локальні перевищення можуть створювати небезпеку для чутливих груп населення (рис. 3.5).

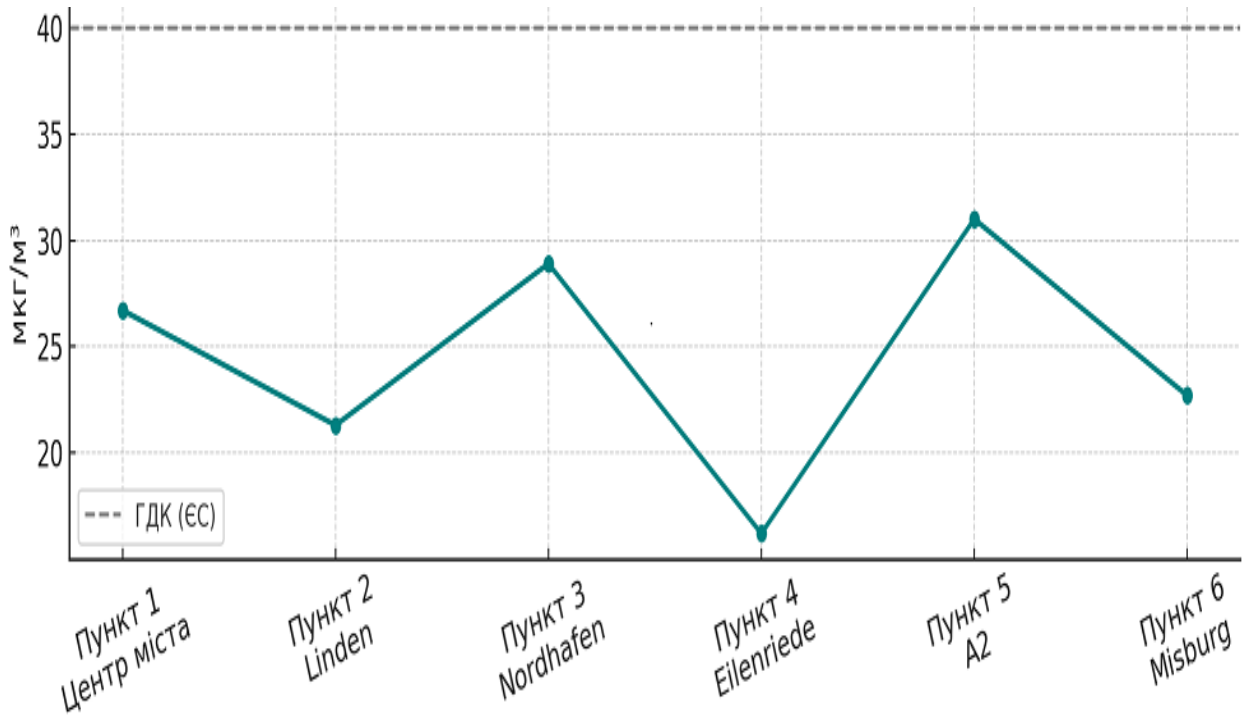


Рис. 3.4 Динаміка концентрацій зважених часток PM_{10} за постами спостережень

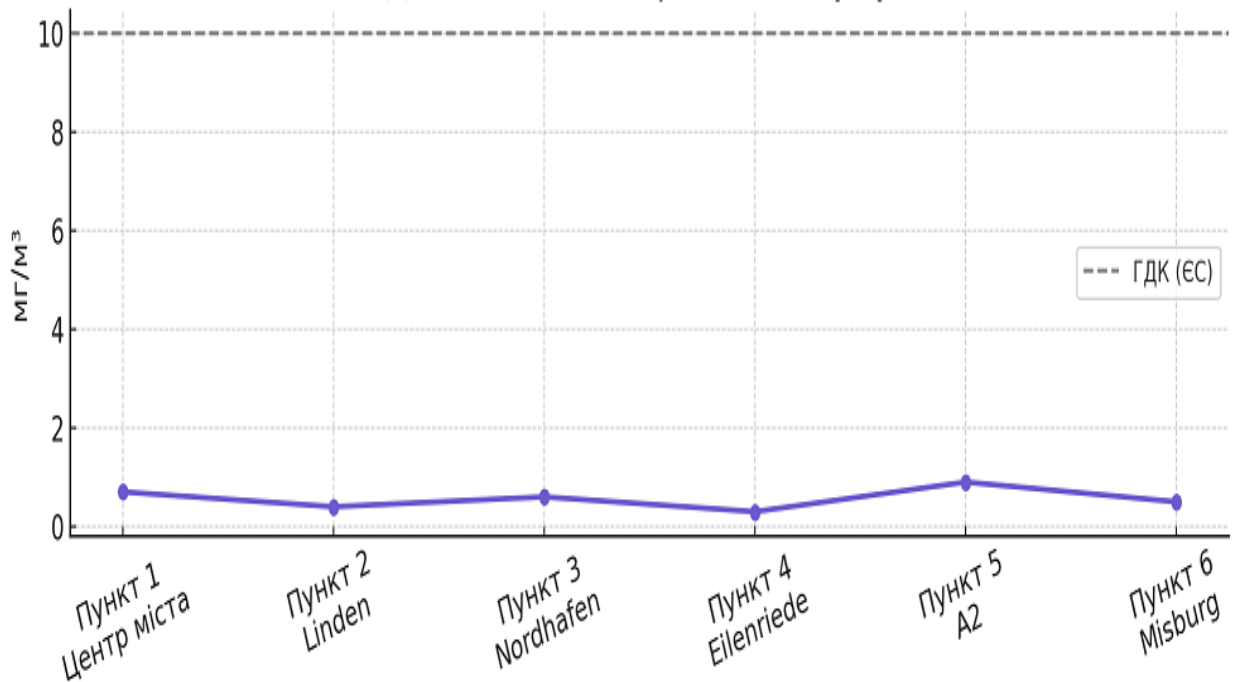


Рис. 3.5 Динаміка концентрацій оксиду вуглецю (CO) за постами спостережень

Концентрації $PM_{2.5}$ залишаються нижчими за гранично допустиме значення ЄС (25 мкг/м^3), однак перевищують рекомендації ВООЗ (5 мкг/м^3). Найвищі рівні зафіксовано в пунктах 3 та 5 — промислова зона та автострада відповідно. Це свідчить про значний вплив як транспорту, так і сезонного опалення. Найнижчі показники — у парковій зоні (пункт 4), що підтверджує роль зелених насаджень у зменшенні пилового забруднення (рис. 3.6).

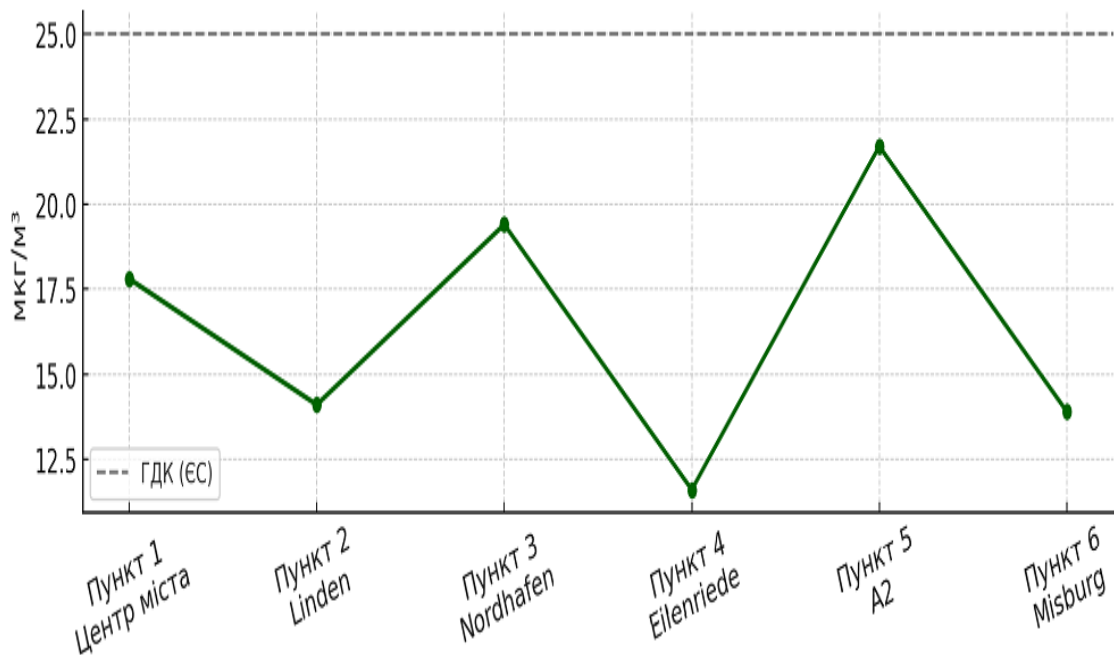


Рис. 3.6 Динаміка концентрацій зважених часток $PM_{2.5}$ за постами спостережень

Концентрації озону не перевищують допустимий восьмигодинний максимум (120 мкг/м^3), однак наближаються до цього порогу в пунктах 4 і 6. У центрі міста (пункт 1) рівень озону найнижчий, що зумовлено його хімічною взаємодією з оксидами азоту. Вищі значення фіксуються у менш забруднених районах, що характерно для озону як вторинного забруднювача (рис. 3.7).

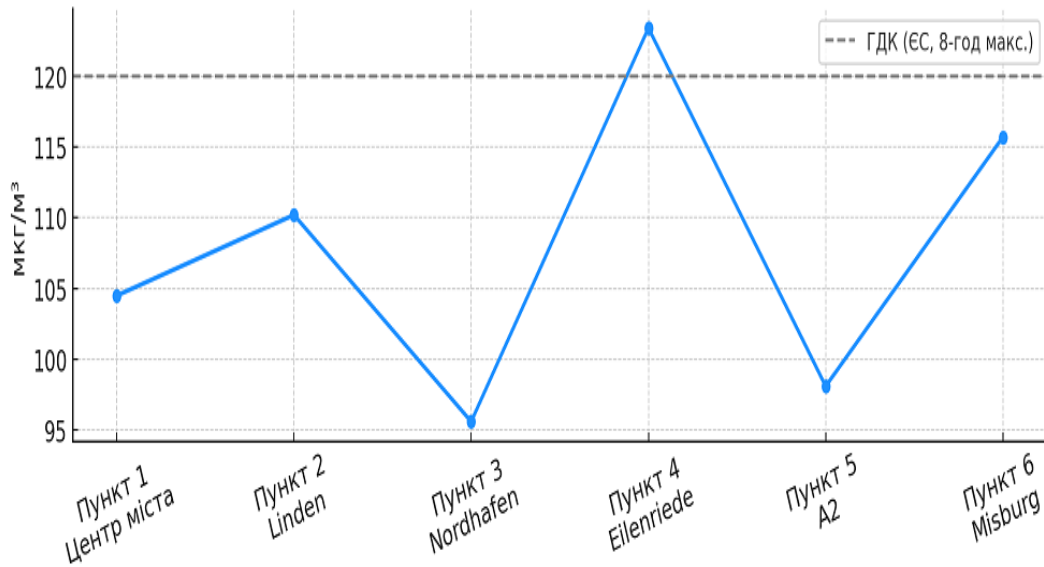


Рис. 3.7 Динаміка концентрацій озону (O_3) за постами спостережень

Усі значення бензолу залишаються нижчими за граничний рівень ЄС (5 мкг/м³), однак перевищують суворішу рекомендацію ВООЗ (0.3 мкг/м³). Найвищі концентрації виявлено поблизу транспортних вузлів (пункт 5) та в промисловій зоні (пункт 3). Це свідчить про вплив вихлопних газів та спалювання вуглеводневого пального. Найнижчі показники — в парковій зоні та на околицях міста (рис. 3.8).

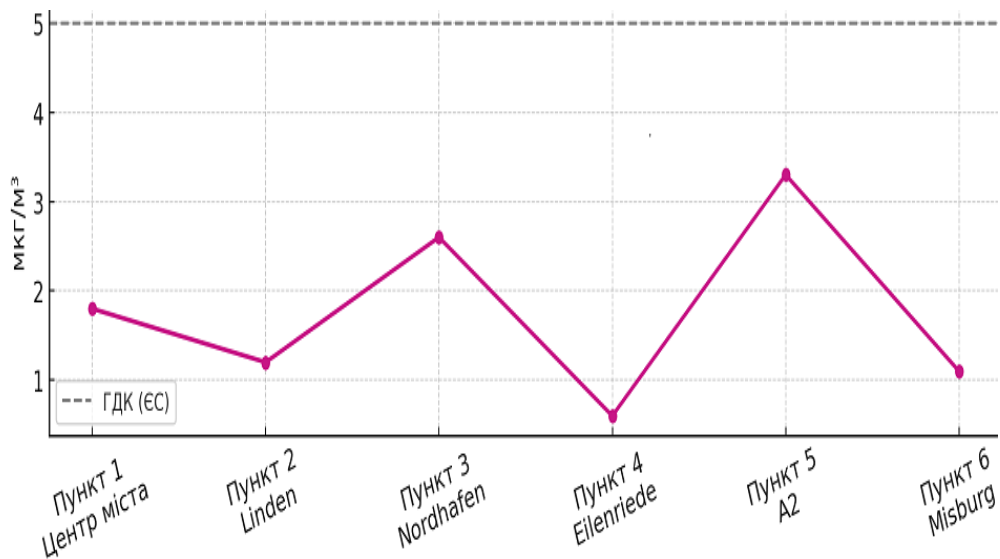


Рис. 3.8 Динаміка концентрацій бензолу (C_6H_6) за постами спостережень

3.3. Розрахунок індексу забруднення повітря

Оцінка величини екологічного ризику дозволяє провести ранжування основних атмосферних забруднювачів за ступенем їх впливу на якість повітря та здоров'я населення. Це дає змогу ідентифікувати пріоритетні речовини, які в першу чергу потребують впровадження заходів щодо зменшення їх концентрацій у повітрі.

У даному дослідженні екологічний ризик оцінювався за допомогою індексу забруднення повітря (AQI), адаптованого до європейських та міжнародних нормативів (директиви ЄС, рекомендації ВООЗ). Як нормативне значення приймалося гранично допустиме значення (ГДК) для кожної речовини. Екологічний ризик розраховувався як відношення середньорічної концентрації до відповідного ГДК, що дозволяє оцінити рівень перевищення або відповідності стандартам.

Результати розрахунків екологічного ризику для кожного з шести пунктів моніторингу наведено на рис. 3.9 – 3.11.

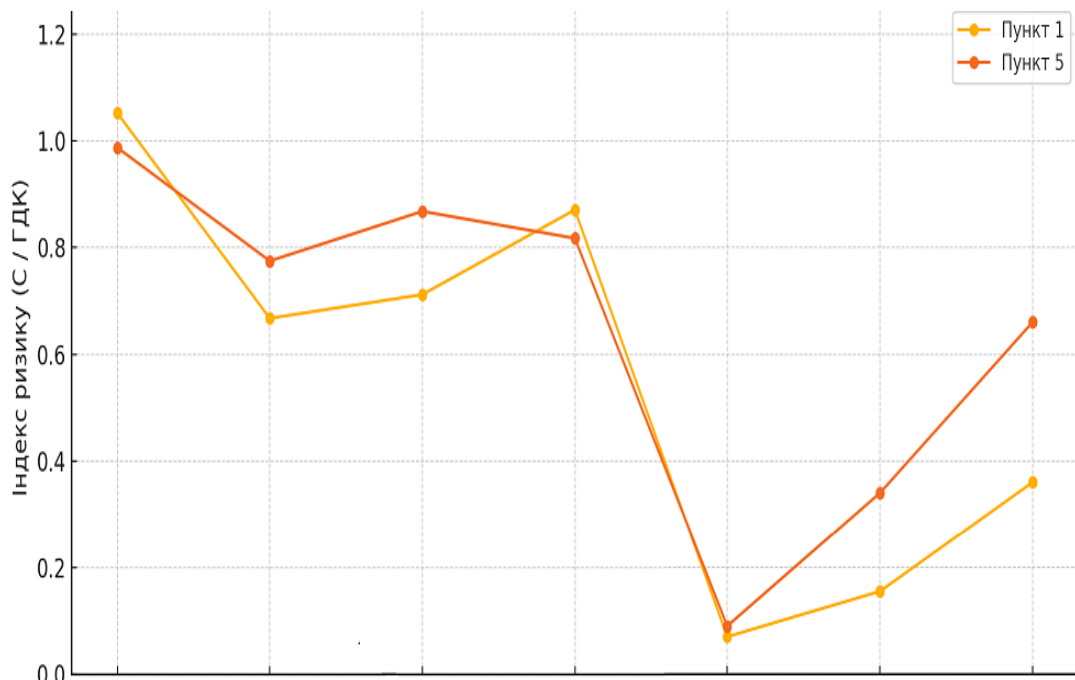


Рис 3.9 Ранжування забруднюючих речовин за екологічним ризиком у пункті 1 (центр міста) та пункті 5 (автострада)

Найвищі значення ризику спостерігаються для NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} , що свідчить про значний вплив автотранспорту.

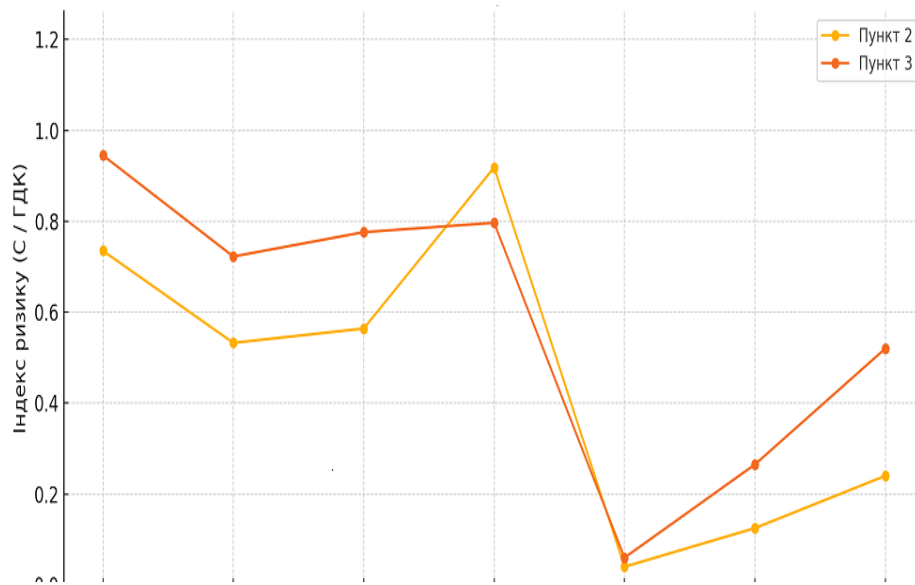


Рис. 3.10 Ранжування забруднюючих речовин у пунктах 2 (житлова зона Linden) та 3 (промислова зона Nordhafen)

У промисловій зоні високі ризики пов'язані з $\text{PM}_{2.5}$ та бензолом, тоді як у житловій зоні — з PM_{10} .

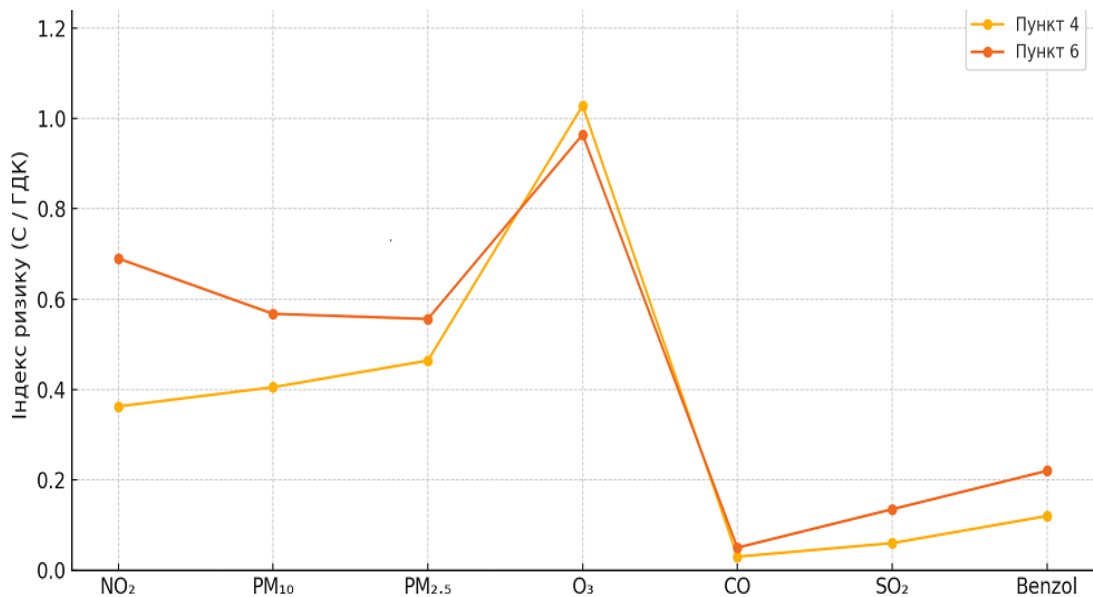


Рис. 3.11 Ранжування забруднюючих речовин у пунктах 4 (парк Eilenriede) та 6 (передмістя Misburg)

Мінімальні значення ризику виявлені в рекреаційних та передміських зонах. Основний внесок робить озон, однак його рівні не перевищують нормативів.

Аналіз ранжування дозволяє визначити, що найбільшу екологічну загрозу становлять оксиди азоту (NO₂), дрібнодисперсні частинки (PM_{2.5}, PM₁₀) та, меншою мірою, бензол. Високі рівні цих речовин спостерігаються у зонах з інтенсивним рухом транспорту та поблизу промислових об'єктів. Відповідно, ці речовини мають пріоритет у розробці заходів із покращення якості повітря в місті.

Таблиця 3.3

Величини сумарного екологічного ризику за пунктами контролю

Пункт контролю	Risk т1	Risk т2	Risk т3	Risk т4	Risk т5	Risk т6
Сумарний екологічний ризик	0.587	0.496	0.656	0.426	0.663	0.511

На основі усередненого індексу ризику (відношення середньорічної концентрації забруднюючих речовин до їх ГДК), отриманого для кожного пункту моніторингу, було розраховано сумарні значення екологічного ризику, наведені в таблиці 3.3. Найвищі рівні ризику спостерігаються в пунктах 3 та 5, що відповідають промисловій зоні Nordhafen та транспортному вузлу на автостраді А2 відповідно. Це свідчить про значний антропогенний тиск з боку промислових викидів та дорожнього транспорту.

Найнижчі значення ризику зафіксовано в пункті 4 — рекреаційна зона Eilenriede, де концентрації всіх речовин значно нижчі за нормативи. Це підкреслює важливість зелених зон для зменшення рівня атмосферного забруднення.

Загалом, екологічний стан повітря в місті Ганновер можна охарактеризувати як помірно забруднений, з окремими зонами підвищеного ризику, що потребують впровадження локальних заходів щодо зменшення

викидів. Результати є важливою підставою для розробки екологічної політики в межах міського планування.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного дослідження на тему «Оцінка екологічного стану повітря м. Ганновер на основі індексу забруднення повітря» були отримані наступні науково обґрунтовані висновки:

1. Проведений аналітичний огляд літературних джерел, виявлено сучасні підходи до оцінювання якості атмосферного повітря, зокрема на основі інтегральних показників, таких як індекс забруднення повітря (ІЗП). Застосування ІЗП у міжнародній практиці довело його ефективність для комплексної оцінки екологічного стану та ранжування територій за рівнем забруднення.

2. Обґрунтовано вибір досліджуваного регіону - м. Ганновер (Німеччина) як одного з найбільш урбанізованих центрів з високим рівнем антропогенного навантаження. Проаналізовано джерела даних моніторингу якості повітря, зокрема інформацію Федерального агентства з охорони навколишнього середовища Німеччини (Umweltbundesamt) та мережі Luftqualitätsüberwachung Niedersachsen.

3. На основі відкритих статистичних даних за 2015–2023 роки проведено оцінку середньорічних концентрацій основних забруднюючих речовин (NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 , CO , SO_2 , бензол) у шести контрольних пунктах, розташованих у різних районах м. Ганновер. Побудовано графіки динаміки концентрацій та виявлено закономірності поширення забруднювачів у просторі.

4. Встановлено, що найвищі рівні забруднення повітря зафіксовані в центральній частині міста (пункт 1) та поблизу автостради (пункт 5), де спостерігається перевищення граничнодопустимих концентрацій NO_2 , PM_{10} і $\text{PM}_{2.5}$. Найкращий стан атмосферного повітря зафіксований у рекреаційній зоні (пункт 4), де рівень усіх забруднювачів істотно нижчий за нормативи ЄС і ВООЗ.

5. Розрахунок індексу забруднення повітря (ІЗП) дозволив здійснити кількісну оцінку екологічного стану повітряного середовища в м. Ганновер.

Проведено ранжування забруднюючих речовин за величиною ризику, що дало змогу визначити пріоритетні забруднювачі — NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ та бензол.

б. Сумарний екологічний ризик, обчислений як середнє значення індексу ризику за всіма речовинами в кожному пункті, виявився найвищим у пунктах 3 і 5 (0.656 і 0.663 відповідно), що свідчить про критичний рівень впливу транспорту та промисловості. Найнижче значення сумарного ризику зафіксовано в пункті 4 (0.426), що підтверджує роль зелених зон у зменшенні рівня забруднення повітря.

Екологічний стан атмосферного повітря м. Ганновер є неоднорідним: окремі райони характеризуються високим рівнем ризику для здоров'я населення. В умовах сталого розвитку міста необхідним є впровадження заходів із покращення якості повітря — зменшення викидів транспорту, розвиток зелених зон, удосконалення системи моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пузанов С. О. Методичні основи оцінювання якості атмосферного повітря за індексом забруднення. Київ : Екопрес, 2020. 112 с.
2. Міненко О. В. Системи екологічного моніторингу стану атмосфери. Харків : Екопром, 2021. 148 с.
3. Журавель Л. О. Аналіз моделей розрахунку індексу забруднення повітря у міському середовищі. Львів : ЛНУ, 2019. 97 с.
4. Luftqualitätsindex in Deutschland / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Berlin, 2022. 56 с.
5. Air Quality in Europe – 2023 Report / European Environment Agency. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. 128 с.
6. Global Air Quality Guidelines / World Health Organization. Geneva : WHO, 2021. 376 с.
7. Коваленко В. Г. Особливості інтерпретації індексу забруднення атмосферного повітря. Одеса : Екологія, 2018. 104 с.
8. Satsangi P. G., Kumar R., et al. Limitations and modifications in API computation methodology for smart cities // Journal of Environmental Monitoring. 2020. Vol. 22, № 4. P. 541–550.
9. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – AQI / United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C., 2022. 65 с.
10. Air Quality Index Overview [Електронний ресурс] / European Environment Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index>.
11. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо розрахунку індексу забруднення атмосферного повітря : наказ Мінприроди України №160 від 07.08.2007 р. Київ : Міндовкілля, 2007. 34 с.
12. Пастух В. І. Критичний аналіз методів обчислення індексу забруднення повітря в містах України // Екологічний вісник. 2019. № 2. С.

25–31.

13. Brook R. D., Rajagopalan S., et al. Air Pollution and Cardiovascular Disease // *Circulation*. 2017. Vol. 135. P. e934–e959.
14. Науменко І. В. Використання ГІС у системах оцінки стану атмосферного повітря // *Вісник екології*. 2020. № 1. С. 45–52.
15. Підпригора О. О. Оцінка ризику впливу діоксиду азоту на здоров'я мешканців міських територій // *Екологічна безпека*. 2021. № 2. С. 36–41.
16. Науменко І. В. Основні джерела СО в міському середовищі та вплив на населення // *Природничі науки*. 2020. № 3. С. 21–28.
17. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability / Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 2022. 306 с.
18. Air quality in Europe – 2023 report [Електронний ресурс] / European Environment Agency <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2023>.
19. Calderón-Garcidueñas L., Torres-Jardón R., et al. Air Pollution, Cognitive Deficits and Brain Abnormalities // *Environmental Research*. 2020. Vol. 183. P. 109–129.
20. Müller S., Weber P., Braun L., Koch M. Mobile applications for air pollution monitoring in Hannover // *Environmental Technology Reviews*. 2022. Vol. 11. P. 89–98.
21. Schneider J., Engel K., Krüger F., Meyer T. Integration of air quality monitoring systems in German cities // *Urban Environmental Research Journal*. 2023. Vol. 18. P. 22–34.
22. Bolin B., Harper C., Jenkins D., Mendez R. Air quality index and its effectiveness in environmental management in the United States // *Atmospheric Science Review*. 2020. Vol. 15. P. 65–74.
23. Smith A., Brown M., Garcia N., Li W. Methodological challenges in air quality index comparisons across countries // *International Journal of Environmental Studies*. 2021. Vol. 78. P. 301–318.

24. Brauch H., Witte M., Neumann F., Schultz H. Satellite data in air quality monitoring: A step forward in environmental assessments // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195. P. 199–213.

25. Weber P., Koch M., Engel K., Braun L. Challenges in air quality data collection and infrastructure improvements // *Environmental Policy and Practice Journal*. 2024. Vol. 12. P. 41–52.

26. Методика розрахунку індексу забруднення атмосфери (ІЗА) / Інститут гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєєва НАМН України. — Київ : Ін-т гігієни ім. О.М. Марзєєва, 2019. 42 с.