

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

ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В М. КОПЕНГАГЕН (ДАНІЯ) НА ОСНОВІ ІНДЕКСУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

Виконала: студентка 4 курсу, групи ДЕ-42

спеціальності : 101 «Екологія»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Пі автора _____ /Катерина ДАННИК

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Керівник _____ /доц. Віталій БЕЗСОННИЙ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Рецензент _____ /доц. Євгенія МИХАЙЛОВА

(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.КАРАЗІНА

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)

Катерині ДАННИК

(прізвище, ім'я)

1. Тема роботи Просторовий аналіз розподілу забруднення повітря в м. Копенгаген (Данія) на основі індексу забруднення повітря

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

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

Затверджене 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 та технологіями моніторингу атмосферного повітря у містах.

3. Зібрати дані моніторингу атмосферного повітря м. Копенгаген для визначення індексу забруднення повітря.

4. Провести просторовий аналіз розподілу забруднення повітря.

5. Визначити тенденції змін індексу забруднення повітря протягом певного періоду.

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

Дата видачі завдання 20 травня 2024 р.

Студент

підпис

Катерина ДАННИК

ім'я, прізвище

Керівник роботи

підпис

доц. Віталій БЕЗСОННИЙ

посада, ім'я, прізвище

АНОТАЦІЯ
ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В
М. КОПЕНГАГЕН (ДАНІЯ)
НА ОСНОВІ ІНДЕКСУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

Катерина ДАННИК

Кваліфікаційна робота «Просторовий аналіз розподілу забруднення повітря в м. Копенгаген (Данія) на основі індексу забруднення повітря» містить 42 сторінки, 3 розділи, 1 таблицю, 6 рисунків, 2 формули, 30 використаних джерел.

Мета роботи: проведення просторового аналізу розподілу забруднення повітря в м. Копенгаген (Данія) на основі індексу забруднення повітря (AQI).

Об'єкт дослідження: рівень забруднення атмосферного повітря в межах міста Копенгаген (Данія).

Предмет дослідження: просторовий розподіл індексу забруднення повітря (AQI) та вплив на нього основних забруднювачів.

Актуальність дослідження. Якість атмосферного повітря є одним з основних факторів, що визначає стан навколишнього природного середовища та безпеку здоров'я населення. Одним із зручних способів оцінки якості повітря є індекс забруднення повітря — AQI (Air Quality Index). На основі AQI можна не лише оцінити поточний стан повітря, а й відслідковувати його зміни у динаміці, а також порівнювати різні території між собою..

Завдання дослідження передбачали дослідження екологічного стану атмосферного повітря, вивчення методів оцінки та оцінку індексу забруднення атмосферного повітря.

Методи. Аналіз, синтез, опис, методи математичної статистики, методи оцінки екологічного стану атмосферного повітря.

Результати. Визначено основні просторові закономірності розподілу забруднення повітря в м. Копенгаген (Данія) на основі індексу забруднення повітря (AQI).

ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН, АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ, ІНДЕКС
ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

ANNOTATION

SPATIAL ANALYSIS OF AIR POLLUTION DISTRIBUTION IN COPENHAGEN (DENMARK) BASE DON THE AIR POLLUTION INDEX

Kateryna DANNYK

The qualification work, «Spatial Analysis of Air Pollution Distribution in Copenhagen (Denmark) Based on the Air Pollution Index», contains 42 pages, 3 chapters, 1 tables, 6 figures, 2 formulas, and 30 sources used.

The purpose of the work is to conduct a spatial analysis of the distribution of air pollution in Copenhagen (Denmark) based on the air pollution index (AQI).

Object of research: the level of atmospheric air pollution within the city of Copenhagen (Denmark).

The subject of the study is the spatial distribution of the air quality index (AQI) and the impact of major pollutants on it.

Relevance of the study. Air quality is one of the main factors determining the state of the natural environment and the safety of public health. One of the convenient ways to assess airquality is the airpollution index — AQI (Air Quality Index). Quality Index). Based on the AQI, you can not only assess the current state of the air, but also track its changes in dynamics, as well as compare different territories with each other.

The tasks of the research included investigating the ecological state of atmospheric air, studying assessment methods, and estimating the atmospheric air pollution index.

Methods: Analysis, synthesis, description, methods of mathematical statistics, methods of assessing the ecological state of atmospheric air.

*Results:*The main spatial patterns of air pollution distributionin Copenhagen (Denmark) were determined based on the air quality index (AQI).

ENVIRONMENTAL CONDITION, ATMOSPHERIC AIR, AIR POLLUTION
INDEX

ВСТУП.....	
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....	
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В М. КОПЕНГАГЕН НА ОСНОВІ ІНДЕКСУ AQI.....	
2.1. Загальна методологія дослідження.....	
2.2. Методика обробки даних.....	
2.3. Методи визначення забруднюючих речовин в атмосфері.....	
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В М. КОПЕНГАГЕН.....	
3.1. Еколого-географічна характеристика м. Копенгаген.....	
3.2. Просторові відмінності якості повітря в м. Копенгаген.....	
3.3. Аналіз впливу основних забруднювачів на рівень AQI.....	
ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	

ВСТУП

Якість атмосферного повітря є одним з основних факторів, що визначає стан навколишнього природного середовища та безпеку здоров'я населення. Забруднення повітря у містах спричиняється різними джерелами – транспортом, промисловими підприємствами, сезонними викидами від опалення, а також природними чинниками. У країнах з високою щільністю населення, розвиненою транспортною інфраструктурою та значною урбанізацією, ця проблема стає ще більш актуальною. Саме тому питання моніторингу, аналізу і зменшення рівнів забруднення повітря залишається одним із пріоритетних напрямів досліджень у галузі екології.

Одним із зручних способів оцінки якості повітря є індекс забруднення повітря — AQI (Air Quality Index). Цей індекс дозволяє представити рівень забруднення у зрозумілій числовій формі, яка враховує концентрації кількох основних шкідливих речовин. На основі AQI можна не лише оцінити поточний стан повітря, а й відслідковувати його зміни у динаміці, а також порівнювати різні території між собою.

Останнім часом у науковій та прикладній літературі все частіше порушується питання впровадження геоінформаційного та просторового аналізу даних про якість повітря. Такі методи дозволяють виявити територіальні закономірності, зони підвищеного ризику та найбільш забруднені райони у межах міста. Незважаючи на активне використання подібних підходів у великих мегаполісах Азії та США, дослідження такого рівня деталізації для європейських міст, зокрема Копенгагена, зустрічаються рідко. Більшість публікацій стосуються загального стану повітря у країні або національного рівня, тоді як внутрішньоміські відмінності у якості повітря залишаються недостатньо вивченими.

Копенгаген, як столиця Данії, має репутацію екологічно свідомого міста. Проте, навіть за наявності розвиненої інфраструктури для велосипедистів, низького рівня викидів транспорту та ефективного управління відходами, у

певні періоди фіксуються перевищення норм за концентраціями дрібнодисперсних частинок. У місті функціонують автоматизовані станції моніторингу якості повітря, дані з яких доступні для аналізу. Це дає змогу вивчати сезонні коливання та просторовий розподіл забруднення.

Попередній аналіз літератури показав, що хоча методика розрахунку AQI є уніфікованою та широко використовується, конкретні дослідження щодо просторових змін якості повітря у межах Копенгагена представлені недостатньо. Це створює певну прогалину у дослідженні, яку можна частково заповнити, проаналізувавши дані з кількох моніторингових станцій у місті. Важливо також враховувати різницю між центральними та периферійними районами, адже вона дозволяє зрозуміти, як урбанізація впливає на рівень забруднення.

З огляду на вищезазначене, актуальність даного дослідження полягає у необхідності аналізу багаторічних даних про якість повітря у Копенгагені з метою виявлення територій з підвищеним рівнем забруднення, сезонних тенденцій та найбільш впливових факторів.

Мета дослідження – проведення просторового аналізу розподілу забруднення повітря в м. Копенгаген (Данія) на основі індексу забруднення повітря (AQI).

Завдання.

1. Провести огляд літератури щодо досліджуваного питання.
2. Ознайомитися з методами та технологіями моніторингу атмосферного повітря у містах.
3. Зібрати дані моніторингу атмосферного повітря м. Копенгаген для визначення індексу забруднення повітря.
4. Провести просторовий аналіз розподілу забруднення повітря.
5. Визначити тенденції змін індексу забруднення повітря протягом певного періоду.

Об'єкт дослідження – рівень забруднення атмосферного повітря в межах міста Копенгаген (Данія).

Предмет дослідження – просторовий розподіл індексу забруднення повітря (AQI) та вплив на нього основних забруднювачів.

Методи дослідження – аналіз, синтез, опис, методи математичної статистики, методи оцінки екологічного стану атмосферного повітря.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Забруднення атмосферного повітря є однією з найгостріших екологічних проблем сучасного світу. Воно негативно впливає не лише на навколишнє природнє середовище, а й на здоров'я населення, економіку та загальну якість життя. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, близько 99% населення Землі дихає повітрям, яке не відповідає оновленим рекомендаціям ВООЗ щодо безпечного рівня забруднення [1]. Серед основних забруднювачів повітря, що мають найбільший вплив на здоров'я людини, виділяють тверді частинки ($PM_{2.5}$ та PM_{10}), діоксид азоту (NO_2), озон (O_3), оксид вуглецю (CO) та діоксид сірки (SO_2) [2]. Найнебезпечнішими з них є дрібнодисперсні частинки $PM_{2.5}$, які здатні проникати глибоко у легені й навіть потрапляти в кровотік. Високі концентрації цих речовин пов'язують з підвищеною смертністю, загостренням хронічних хвороб, зниженням когнітивних функцій, зростанням випадків астми, алергії, а також загальним погіршенням самопочуття у вразливих груп населення [3]. У містах основними джерелами забруднення повітря залишаються викиди від автотранспорту, промисловості, будівництва та спалювання палива в побуті. Урбанізовані території створюють сприятливі умови для накопичення забруднюючих речовин, особливо за умов слабого вітру та температурних інверсій. Вплив людської діяльності на якість повітря особливо відчутний у мегаполісах, але й у менших містах рівень забруднення може перевищувати допустимі норми [4]. У відповідь на ці виклики у багатьох країнах світу створені системи моніторингу повітря, які дозволяють оцінювати стан атмосфери в режимі реального часу. Для представлення складної інформації у зрозумілій для населення формі використовується індекс якості повітря (AQI) — інтегрований показник, що розраховується на основі концентрацій основних забруднюючих речовин. AQI дозволяє оцінити рівень небезпеки повітря для здоров'я, класифікуючи його за шкалою від «доброї» до «небезпечної» якості [5]. У США,

Європейському Союзу, Китаї, Індії та інших країнах AQI використовується не лише для інформування населення, а й для прийняття рішень на рівні екологічної політики — наприклад, щодо обмеження транспорту в дні з високим рівнем забруднення або призупинення промислових процесів. Проте навіть за наявності таких систем, реальне використання даних AQI для внутрішньоміського просторового аналізу залишається обмеженим [6]. У наукових публікаціях просторовому аспекту забруднення повітря останнім часом приділяють більше уваги, зокрема за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) і супутникового моніторингу. Дослідження виявляють значні відмінності у рівнях забруднення навіть у межах одного міста, що підтверджує потребу у локалізованому аналізі на рівні окремих районів або мікрорайонів [7]. Копенгаген, незважаючи на високий рівень екологічної свідомості та розвинену інфраструктуру для сталого транспорту, також стикається з проблемами забруднення повітря, особливо у центральній частині міста. Моніторингові дані, зокрема з ресурсу AQICN.org, свідчать про коливання рівнів AQI залежно від пори року, погодних умов та особливостей території [8]. Питання просторового аналізу забруднення повітря у міському середовищі активно розглядається у сучасних наукових дослідженнях, особливо у контексті великих урбанізованих територій північної Європи, зокрема Данії та її столиці — Копенгагена.

У роботі Jensen та співавторів [9] розглянуто моделювання концентрацій діоксиду азоту (NO_2) на 98 вулицях Копенгагена з використанням високороздільної моделі. Автори акцентують на важливості мікроурбаністичних характеристик, таких як ширина вулиць, наявність забудови, інтенсивність трафіку, які суттєво впливають на формування локальних зон із підвищеним рівнем забруднення. Goodsite та колеги [10] досліджували джерела забруднення у скандинавських містах, приділяючи особливу увагу викидам оксидів азоту (NO_x) на прикладі вулиці Jagtvej у Копенгагені. Результати дослідження підкреслюють роль транспортного сектору у формуванні високих концентрацій поллютантів в урбанізованих зонах. У роботі Manders і Ketznel [11] представлено карту розподілу забруднення повітря на території Данії з просторовою роздільністю до 1 км. Було виявлено, що центр Копенгагена демонструє найвищі

концентрації дрібнодисперсних частинок, що підтверджує актуальність локального аналізу міського середовища при формуванні екологічної політики .Johansson та ін. [12] розробили і адаптували для північних країн операційну модель просторового прогнозування якості повітря ENFUSER. Вона дозволяє враховувати не лише метеорологічні параметри, а й особливості міського середовища, що робить її ефективним інструментом для аналізу якості повітря у таких містах, як Копенгаген. Цінні порівняльні дані наведено у публікації Torkayesh та ін. [13], де аналізується рівень якості повітря у 22 європейських країнах. Данія виявилась серед країн із найнижчими середніми рівнями $PM_{2.5}$, що частково пояснюється ефективністю екологічної політики на національному та місцевому рівнях. У дослідженні Zhou та ін. [14] розглянуто зв'язок між рівнем вегетації (NDVI) та концентрацією забруднюючих речовин у різних регіонах Європи. Показано, що зелені насадження мають значний вплив на зменшення концентрацій забруднення, особливо в щільно забудованих міських районах. Shoaib з колегами [15] проаналізували вплив міських зелених зон на рівень задоволеності мешканців та індекс якості повітря (AQI). Незважаючи на те, що основне дослідження було проведено у Лахорі, досвід Копенгагена розглядається як позитивний приклад інтеграції зелених просторів у міське середовище для зниження рівнів $PM_{2.5}$ та NO_2 .

Питання екологічної нерівності у містах Європи, включно з Копенгагеном, досліджуються у роботі Ganzleben і Kazmierczak [16]. Автори зазначають, що доступ до чистого повітря нерівномірно розподілений у межах міського простору та має чіткий зв'язок із соціально-економічними характеристиками населення.

У статті Hossain та ін. [17], хоча й присвяченій містам Бангладешу, здійснюється порівняльний аналіз із європейськими містами, зокрема Копенгагеном, як прикладом міста з добре організованою політикою контролю якості повітря. Це дозволяє оцінити ефективність стратегій зниження забруднення в урбанізованому середовищі. Palència та співавт. [18] у своїй роботі досліджують вплив міського дизайну на здоров'я та екологічну рівність, використовуючи приклад «супер кварталів» у Барселоні. Автори

наголошують, що подібні підходи можуть бути успішно адаптовані для таких міст, як Копенгаген, що вже демонструє високий рівень інтеграції міського планування та екологічної безпеки. У роботі Imam et al. [19] запропоновано використання методів машинного навчання для прогнозування AQI на основі багатовимірних екологічних та метеорологічних даних. Автори проаналізували ефективність різних моделей і дійшли висновку, що найкращі результати дає ансамблева модель градієнтного бустингу. Особливо цінним є те, що в дослідженні враховано умови Північної Європи, що робить результати релевантними для аналізу Копенгагена. Дослідження Fung та колег [20] спрямоване на вдосконалення існуючої системи розрахунку AQI шляхом включення нових показників твердих частинок та медичних критеріїв ризику. Автори зазначають, що класичний AQI не завжди відображає сучасну структуру викидів, зокрема у містах Північної Європи, де впроваджено суворі екологічні обмеження. З іншого боку, Castell et al. [21] зосередили увагу на локальному вимірюванні якості повітря за допомогою недорогих сенсорних вузлів, розміщених біля дитячих садків в Осло. У статті запропоновано використання адаптованого європейського індексу CAQI, що може стати прикладом для муніципального моніторингу в Копенгагені. Автори використали багаторівневу модель з високою просторовою роздільністю для оцінки концентрацій NO_2 , PM_{10} і $\text{PM}_{2.5}$ у всіх вулицях Данії. Зокрема, центр Копенгагена виявився зоною з найвищими значеннями забруднення, що підтверджує попередні висновки про нерівномірність просторового розподілу AQI. У дослідженні Nakhjiriі Kakroodi [22] було застосовано поєднання супутникових і наземних даних для створення 3D-моделей забруднення повітря. Незважаючи на те, що основний кейс стосується Ірану, автори проводять аналогії з європейськими індустриальними центрами, включно з Копенгагеном, підкреслюючи потенціал таких моделей у просторовому аналізі промислових зон.

Загальноєвропейські підходи аналізує Singh та ін. [23], які описують особливості адаптації систем моніторингу AQI до кліматичних умов північної Європи. У роботі наведено приклади з Гельсінкі та Копенгагена, де виявлено просторову кореляцію між рівнями NO_2 та наявністю пішохідної

інфраструктури. Це свідчить про вплив міського дизайну на екологічні показники. У роботі Willberg et al. [24] досліджується вплив забруднення повітря, шуму та кількості зелених насаджень на велосипедистів у місті Гельсінкі. Методологія базується на інтеграції даних про AQI, індексу NDVI та шумового навантаження, що дає змогу створити високоточну картину екологічного комфорту. Подібний підхід може бути успішно адаптований для аналізу просторової структури забруднення в Копенгагені.

Огляд Bougiatioti et al. [25] акцентує увагу на довготривалих тенденціях забруднення повітря в європейських містах. Автори зазначають, що країни Північної Європи, зокрема Данія, демонструють стабільно нижчі рівні забруднення завдяки ефективній транспортній політиці та міському плануванню. Це дозволяє зменшити хронічне інгаляційне навантаження на мешканців. Дослідження Jerhcote et al. [26] демонструє, як політичні рішення (зокрема карантинні обмеження під час пандемії COVID-19) можуть миттєво змінювати просторову структуру забруднення повітря в містах, подібних за морфологією до Копенгагена. Зафіксовано суттєве зниження рівнів NO₂ та PM_{2.5} в умовах зниженого трафіку. У роботі Dimitriou et al. [27] оцінюється вплив індексу забруднення повітря на здоров'я населення в містах ЄС. Данія розглядається як приклад ефективного впровадження індексного підходу до оцінювання інгаляційного ризику. Методика враховує густоту забудови, інтенсивність трафіку та сезонну змінність. Дослідження Tajetal [28] розглядає медичні наслідки довготривалого впливу забруднення повітря. Моделювання із застосуванням ДЕНМ-підходу показало, що навіть у країнах із відносно чистим повітрям існують «локальні зони ризику» — ділянки з підвищеною концентрацією поллютантів, які потенційно пов'язані з підвищеним ризиком онкозахворювань. Це підтверджує необхідність високороздільного просторового аналізу AQI на рівні міських мікрорайонів.

У межах одного міста рівень забруднення повітря може суттєво варіюватися залежно від різноманітних факторів: щільності забудови, інтенсивності транспортного потоку, наявності зелених зон, метеорологічних умов, рельєфу та типу поверхні. Високий рівень урбанізації, наявність щільного дорожнього

трафіку та інтенсивне використання приватного автотранспорту формують локальні зони з підвищеним рівнем забруднення, зокрема по трасах, вулицях каньйонного типу або у районах, обмежених щільною забудовою [9; 11; 22].

Ураховуючи вищевикладене, можна стверджувати, що вивчення внутрішньоміського розподілу забруднення повітря на прикладі Копенгагена є актуальним як у науковому, так і в практичному контексті. Підвищення точності та локалізації оцінки забруднення дозволяє приймати більш обґрунтовані рішення на рівні міського планування, розвитку транспортної мережі та озеленення.

Таким чином, проблема забруднення повітря є не лише глобальною, а й локальною. Вона потребує детального вивчення в контексті конкретного міста. Просторовий аналіз індексу якості повітря дозволяє глибше зрозуміти структуру забруднення, виявити найбільш проблемні зони, та сформулювати практичні рекомендації для зменшення впливу шкідливих речовин на населення.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В М. КОПЕНГАГЕН НА ОСНОВІ ІНДЕКСУ AQI

2.1. Загальна методологія дослідження

У дослідженні застосовано метод просторового аналізу якості повітря на основі даних про індекс забруднення повітря (Air Quality Index, AQI), отриманих із відкритого джерела AQICN.org. Індекс AQI використано як узагальнений показник, що враховує концентрації основних забруднюючих речовин: $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , CO та O_3 . Його застосування дозволяє порівнювати якість повітря у різних просторових точках та динаміку змін впродовж 2013–2024 років.

Було обрано три моніторингові станції в межах м.Копенгаген:

- Н.С. Andersens Boulevard – зона з інтенсивним дорожнім рухом;
- Н.С. ØrstedInstitutet – територія з переважно навчальними та науковими установами;
- Riso – передмістя, що характеризується меншою щільністю забудови.

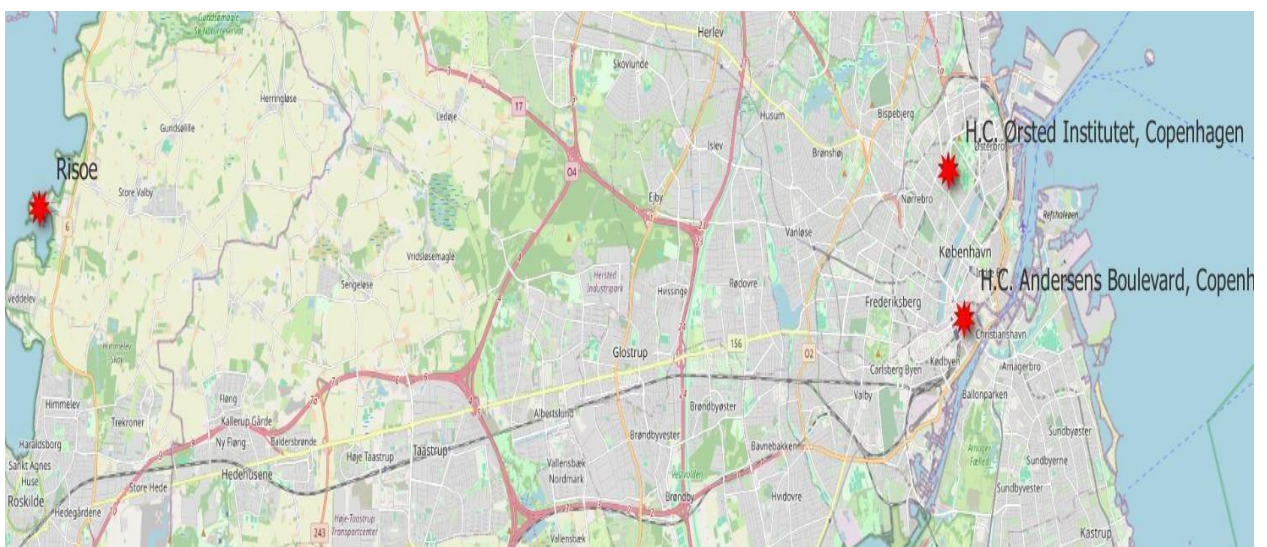


Рис.2.1 Розташування станцій моніторингу повітря

Обрані локації репрезентують різні типи урбаністичних середовищ, що дозволяє дослідити внутрішньоміську варіативність AQI. Моніторингові дані були зібрані зі згаданого ресурсу AQICN.org, який забезпечує відкритий доступ до історичних значень індексу AQI. Для кожної з трьох станцій було зібрано щорічні значення AQI за період 2013–2024 рр., а також середньорічні концентрації таких забруднювачів: PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, CO, SO₂, O₃.

2.2. Методика обробки даних

Для обробки первинних даних, отриманих із платформи AQICN.org, використовувались табличні розрахунки в середовищі Microsoft Excel.

Значення індексу якості повітря (AQI) для кожного з основних забруднювачів (PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, O₃, CO, SO₂) розраховувались на основі офіційного алгоритму, що передбачає використання формули лінійної інтерполяції:

$$AQI = \frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}} * (C - C_{low}) + I_{low} \quad (2.1)$$

Де C —концентрація забруднювача в атмосфері.

C_{low} і C_{high} — нижнє і верхнє значення діапазону концентрації для забруднювача.

I_{low} і I_{high} — нижнє і верхнє значення індексу AQI для відповідного діапазону концентрацій.

Індекс розраховується окремо для кожної речовини, після чого за правилом максимуму обирається найбільше значення AQI як інтегральний показник для локації на певну дату:

$$AQI_{total} = \max(AQI_{PM2.5}, AQI_{PM10}, AQI_{NO2}, AQI_{SO2}, AQI_{CO}, AQI_{O3}) \quad (2.2)$$

Ця методика дозволяє зафіксувати найбільш небезпечний компонент забруднення повітря у певний момент часу.

Для інтерпретації отриманих значень AQI у дослідженні використано офіційно рекомендовану шкалу якості повітря, розроблену Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ). Ця шкала дозволяє класифікувати рівень забруднення за ступенем безпеки для здоров'я населення (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Шкала якості повітря Всесвітньої організації охорони здоров'я

Діапазон AQI	Категорія якості повітря	Характеристика впливу
0–50	Добре	Повітря чисте, не несе загроз.
51–100	Задовільне	Можливе незначне погіршення стану здоров'я чутливих осіб.
101–150	Помірне забруднення	Помітний вплив на чутливі групи (астматики, діти, літні люди).
151–200	Шкідливе	Вплив на здоров'я може виникати навіть у здорових людей.
201–300	Дуже шкідливе	Здоров'я населення перебуває під загрозою.
>300	Небезпечне	Значна небезпека для всіх категорій населення.

При виконанні дослідження кожне розраховане значення AQI було віднесено до відповідної категорії. Це дозволило провести не лише кількісну, а й якісну оцінку змін у забрудненні повітря у різних районах Копенгагена за період дослідження.

Ефективний контроль за станом атмосферного повітря неможливий без якісного моніторингу концентрацій забруднюючих речовин. Сучасна система оцінювання якості повітря ґрунтується на сукупності різноманітних методів - від автоматизованих вимірювань у реальному часі до детального лабораторного аналізу. Кожен метод має власні переваги, сферу застосування, рівень точності та технічні вимоги [29, 30].

В умовах урбанізованих територій, таких як Копенгаген, особливої актуальності набувають методи, що дозволяють не лише фіксувати фактичну концентрацію поллютантів, а й оперативно інтерпретувати дані у вигляді комплексного показника — індексу якості повітря (AQI). У даному підрозділі розглянемо три основні групи методів: інструментальні, лабораторні та модельні, які використовуються у сфері екологічного моніторингу.

Інструментальні або приладові методи — це найбільш поширений та надійний спосіб визначення рівня забруднення повітря у містах. Вони передбачають безпосереднє вимірювання концентрацій шкідливих речовин у повітрі за допомогою автоматизованих станцій спостереження, які можуть працювати у режимі реального часу.

Основні принципи роботи автоматизованих приладів полягають у використанні фізико-хімічних властивостей речовин.

Бета-абсорбційний метод застосовується для вимірювання масової концентрації зважених частинок PM_{10} та $PM_{2.5}$. Прилад пропускає бета-промені через фільтр із накопиченим пилом і фіксує ступінь ослаблення сигналу.

Хемілюмінесцентний метод використовується для визначення концентрації оксидів азоту (NO і NO_2). Він базується на хімічній реакції оксиду азоту з озоном, в результаті якої виділяється світло, інтенсивність якого вимірюється фотоелементами.

Ультрафіолетова флуоресценція – метод, що застосовується для вимірювання діоксиду сірки (SO₂). Молекули SO₂ при поглинанні УФ-випромінювання переходять у збуджений стан і випромінюють флуоресцентне світло, яке фіксується детектором.

Інфрачервоні аналізатори – використовуються для визначення рівня монооксиду вуглецю (CO). Вимірювання базуються на здатності CO поглинати інфрачервоні хвилі певної довжини.

Ці прилади забезпечують високу точність, надійність та можливість довготривалого безперервного вимірювання, що особливо важливо для щоденного екологічного моніторингу у великих містах. У багатьох країнах такі станції встановлюються державними органами охорони навколишнього середовища та інтегруються у міжнародні моніторингові системи (наприклад, ЕЕА — Європейська екологічна агенція).

В умовах Копенгагена саме ці автоматизовані станції (зокрема, на Н.С. Andersens Boulevard, Ørsted Institutet, Risoe) формують первинну базу даних, яка використовується у відкритих платформах типу AQICN.org.

Лабораторні методи є більш трудомісткими, однак дозволяють отримати високоточні дані про хімічний склад атмосферного повітря, включаючи малоконцентровані та специфічні забруднювачі, які не завжди виявляються автоматизованими станціями. Основні підходи включають гравіметричний аналіз, який полягає у відборі проб повітря через фільтр, де осаджуються зважені частинки. Після висушування фільтр зважується, і за різницею мас визначається концентрація пилу в мкг/м³.

Хроматографічні методи (газова або рідинна хроматографія) використовуються для аналізу вуглеводнів, летких органічних сполук (ЛОС), бензолу, толуолу тощо.

Атомно-абсорбційна спектроскопія дозволяє виявляти сліди важких металів у повітрі, таких як свинець, кадмій, миш'як.

Титрування застосовується для визначення кислотності повітря, вмісту аміаку або оксидів азоту в розчинах, що імітують атмосферні умови.

Такі методи найчастіше використовуються у наукових дослідженнях, лабораторіях університетів, а також для контрольних перевірок даних, отриманих автоматизованими системами.

Модельні методи набувають дедалі більшої популярності в умовах урбанізованого середовища, де розміщення великої кількості станцій моніторингу є технічно або фінансово неможливим. Вони дозволяють спрогнозувати концентрації забруднюючих речовин, виявити "гарячі точки", а також аналізувати вплив метеорологічних умов на рівень забруднення. До найбільш відомих моделей належать ENFUSER (Environmental Information Fusion Service) — модель, адаптована для міст Північної Європи, яка враховує погодні умови, тип забудови, джерела викидів.

AERMOD, CALPUFF — моделі атмосферної дисперсії, схвалені USEPA.

ДЕНМ — модель, яка використовується в Данії для регіонального аналізу та врахування транскордонного перенесення забруднень.

У простіших випадках використовуються методи статистичної інтерполяції (IDW, Kriging), які дозволяють екстраполювати дані між станціями спостереження. Актуальним також є застосування машинного навчання — як показано у роботі [19], моделі градієнтного бустингу дають високий рівень точності у прогнозуванні AQI на основі великого обсягу екологічних та метеоданих.

Для дослідження забруднення атмосферного повітря у м. Копенгаген було використано розрахункову модель AQI, яка спирається на офіційну формулу інтерполяції значень (2.1), що дозволило узагальнити вплив кожного полютанта та забезпечити єдину шкалу порівняння для всіх локацій міста.

РОЗДІЛ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В М. КОПЕНГАГЕН

3.1. Еколого-географічна характеристика м. Копенгаген

Місто Копенгаген (дан. København) є столицею та найбільшим містом Королівства Данія. Розташоване на східному узбережжі острова Зеландія (Sjælland) та частково на острові Амагер, воно омивається водами протоки Ересунн, яка розділяє Данію і Швецію. Географічні координати Копенгагена - 55°40' пн. ш., 12°34' сх.д. — визначають його положення у зоні помірного морського клімату з відносно м'якими зимами та прохолодним літом. Загальна площа муніципалітету Копенгаген становить близько 88 км², а населення перевищує 800 тисяч осіб, що робить його найгустішим за кількістю жителів містом країни.

Копенгаген знаходиться на рівнинній місцевості, середня висота над рівнем моря становить близько 10–15 метрів. Значна частина міста розташована на колишніх морських відкладеннях, пісках та глинах, що утворилися в процесі після льодовикового формування ландшафтів. Місто має природні межі, сформовані береговою лінією, а також численними каналами, штучними водоймами та затоками. Поблизу міста розташовані важливі природні заповідники, рекреаційні зелені зони та ліси, які становлять екологічну цінність не лише для столиці, але й для всього регіону.

Через Ересунн Копенгаген з'єднано зі шведським містом Мальме завдяки одному з найбільших інфраструктурних проєктів у Європі — мосту Ересунн, який функціонує як автомобільна та залізнична артерія. Це зумовлює інтенсивний транспортний обмін, який впливає і на структуру забруднення повітря в прикордонній зоні.

Копенгаген характеризується морським помірно-континентальним кліматом за класифікацією Кеппена (тип Cfb). Середньорічна температура

становить $+8,5-9,0^{\circ}\text{C}$, найхолодніший місяць — січень (у середньому -1°C), найтепліший — липень ($+20^{\circ}\text{C}$). Річна сума опадів коливається в межах 600–700 мм. Опади мають рівномірний розподіл упродовж року, хоча спостерігається помірна перевага в осінньо-зимовий період.

Однією з важливих особливостей клімату є постійна циркуляція повітряних мас завдяки морському впливу. Домінуючі вітри — західні та південно-західні — сприяють регулярній вентиляції міста, що, з одного боку, покращує розсіювання забруднювачів, але з іншого — сприяє їх переносу в приміські зони. Саме вітровий режим виявляється критично важливим у дослідженнях просторового розподілу забруднення повітря.

Копенгаген має чітко виражену радіально-кільцеву структуру міської забудови. Історичний центр (Indre By) є зоною найвищої щільності забудови, де переважає змішане використання земель — комерційне, адміністративне та житлове. Саме тут фіксується один з найвищих рівнів транспортного навантаження, що впливає на локальне підвищення концентрації забруднюючих речовин, зокрема NO_2 та $\text{PM}_{2.5}$.

Значна увага в місті приділяється зонуванню. У середньому понад 25% території займають зелені зони — парки, бульвари, міські ліси, водно-болотні угіддя. Зелені простори виконують важливу екологічну функцію — не лише рекреаційну, а й санітарну, оскільки вони сприяють поглинанню частинок пилу та оксидів азоту.

Передмістя Копенгагена (зокрема райони, що наближені до станції Risoe, яка використана в цьому дослідженні) характеризуються меншою щільністю забудови, більшою кількістю природної рослинності та меншим впливом дорожнього транспорту. Це створює сприятливі умови для зниження рівня забруднення та робить ці території референтними зонами для аналізу.

Транспортна інфраструктура Копенгагена складається з розвиненої мережі автомагістралей, кільцевих доріг, велосипедних трас та громадського транспорту. Попри активне просування екологічно чистого транспорту (велосипеди, електробуси, метро), автомобільний транспорт залишається

одним з головних джерел забруднення. За даними муніципалітету, щоденно в центр міста в'їжджає понад 200 тисяч одиниць автотранспорту.

Одним із найбільш забруднених транспортних коридорів є Н.С. Andersens Boulevard, що фігурує у даному дослідженні. Саме на цій локації регулярно фіксуються перевищення середньорічних концентрацій NO_2 та $\text{PM}_{2.5}$. Цей приклад демонструє чіткий взаємозв'язок між типом забудови, транспортним навантаженням та якістю повітря в межах одного міста.

Копенгаген відомий як одне з найбільш "зелених" міст Європи. У 2009 році він був обраний «Зеленою столицею Європи», а стратегічна мета міста — стати вуглецево-нейтральним до 2025 року. В межах цього плану реалізуються численні проекти:

- заміна дизельного транспорту на електричний;
- розвиток вело інфраструктури (понад 390 км велодоріжок);
- перетворення центральних районів на пішохідні;
- озеленення дахів і стін будівель;
- розширення зон низького викиду (LEZ).

Крім того, муніципалітет активно підтримує ініціативи з екологічного моніторингу, зокрема впровадження мережі недорогих сенсорів якості повітря, що дозволяє з високою деталізацією відстежувати просторовий розподіл забруднювачів.

Не зважаючи на загальну сприятливу екологічну ситуацію, локальні зони з підвищеним рівнем забруднення залишаються актуальною проблемою. Серед основних джерел викидів:

- автотранспорт (особливо дизельний),
- комерційне обігрівання приміщень,
- індивідуальні джерела викидів (печі, каміни),
- транскордонне перенесення забруднень з інших регіонів Балтії.

За даними Європейської екологічної агенції, середній рівень $\text{PM}_{2.5}$ у м. Копенгагену 2022 році становив 10–12 $\text{мкг}/\text{м}^3$, що відповідає середньому показнику для Північної Європи, але все ще перевищує нові рекомендовані межі ВООЗ (5 $\text{мкг}/\text{м}^3$).

Географічні, кліматичні та урбаністичні особливості Копенгагена створюють як сприятливі, так і ризиковані умови для формування просторово нерівномірного забруднення повітря. Міська політика в галузі екології демонструє високий рівень амбіційності, однак у центральних районах і досі спостерігаються локальні перевищення концентрацій шкідливих речовин. Саме тому дослідження просторового розподілу індексу AQI у межах міста є важливим інструментом для обґрунтованого екологічного управління та подальших рішень у сфері містобудування.

3.2. Просторові відмінності якості повітря в м. Копенгаген

У межах міського простору якість повітря є неоднорідною та значною мірою залежить від типу забудови, інтенсивності транспортного руху, наявності зелених насаджень, джерел викидів та метеорологічних умов. В даному дослідженні для оцінки просторових відмінностей забруднення в Копенгагені було обрано три контрастні локації:

- Н.С. Andersens Boulevard — транспортна артерія в центрі міста;
- Н.С. Ørsted Institutet — освітньо-науковий район із помірно інфраструктурною забудовою;
- Riso — передмістя з низькою щільністю забудови, близьке до природних територій.

Ці точки демонструють різні типи міського середовища, що дозволяє оцінити вплив урбаністичних чинників на рівень забруднення повітря.

Аналіз динаміки індексу забруднення повітря (AQI) для *станції Н.С. Andersens Boulevard* базується на багаторічних даних про концентрації основних забруднюючих речовин: PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, SO₂, та CO. Ці дані було використано для розрахунку річних значень AQI у період з 2013 по 2024 рік (рис. 3.1.).

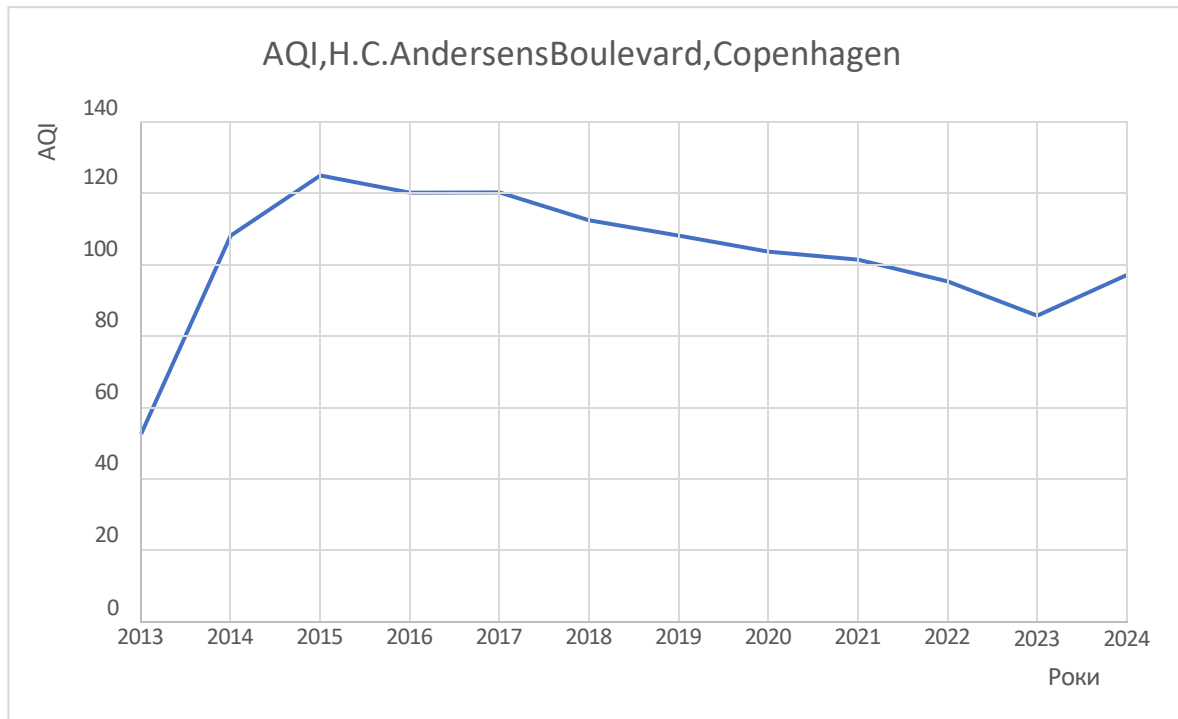


Рис. 3.1 Динаміка річних значень AQI у період з 2013 по 2024 рік для моніторингової станції Н.С. Andersens Boulevard

Згідно з отриманими результатами 2013 рік показав найнижчий індекс забруднення повітря — 48,15, що відповідає категорії "Хороший" за шкалою AQI. 2014–2019 роки характеризуються підвищенням рівня AQI, при цьому максимум досягнуто у 2015 році — 120,56. Це відноситься до категорії "Шкідливий для чутливих груп", що означає, що якість повітря була небезпечною для вразливих груп населення. Починаючи з 2020 року, AQI почав знижуватися. Найнижчий рівень забруднення за цей період був зафіксований у 2023 році—81,26, що відповідає категорії "Помірний". У 2024 році AQI знову зріс до 92,66, що все ще відповідає категорії "Помірний", але свідчить про незначне погіршення якості повітря.

Аналіз концентрацій забруднювачів (рис. 3.2) показує наступне. $PM_{2.5}$ та PM_{10} (дрібно дисперсні частинки) є основними компонентами, що спричиняють

високе значення AQI. У перші роки (2013–2015) концентрація $PM_{2.5}$ залишалася високою — до $59,82 \text{ мкг/м}^3$ у 2014 році. З 2016 року спостерігається поступове зниження концентрації $PM_{2.5}$, яка до 2023 року становила $33,16 \text{ мкг/м}^3$, однак у 2024 році знову спостерігається її збільшення до $38,04 \text{ мкг/м}^3$. PM_{10} демонструє схожу тенденцію, зниження з максимальних значень $26,68 \text{ мкг/м}^3$ у 2016 році до мінімуму $18,22 \text{ мкг/м}^3$ у 2024 році. Концентрація NO_2 є показником транспортного забруднення і теж мала тенденцію до зниження протягом аналізованого періоду, з максимуму $23,24 \text{ мкг/м}^3$ у 2014 році до мінімуму $8,39 \text{ мкг/м}^3$ у 2024 році.

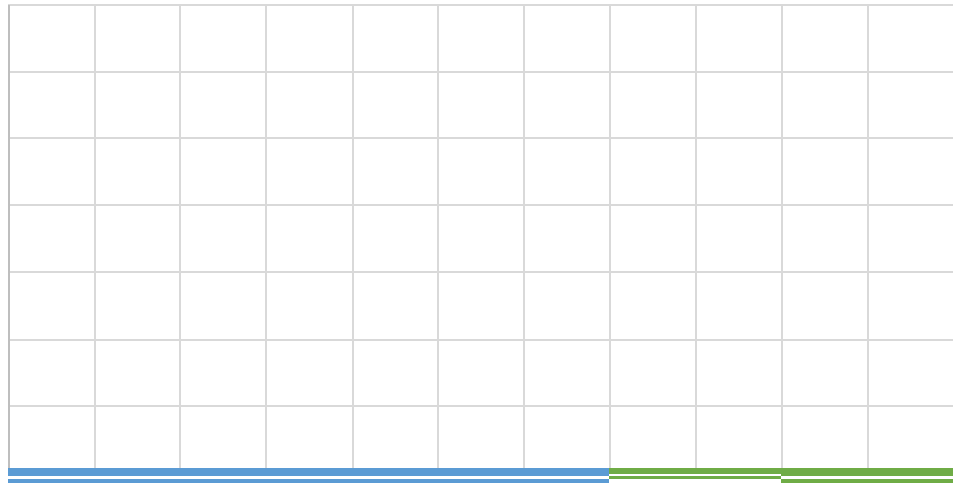


Рис.3.2 Динаміка річних значень забруднювачів атмосферного повітря у період з 2013 по 2024 рік для моніторингової станції Н.С. Andersens Boulevard

Зниження цього показника вказує на покращення якості повітря, можливо, завдяки екологічним заходам у транспортній сфері. Концентрації SO_2 залишалися стабільними та низькими протягом усього періоду. Найвищі значення були в 2014 році ($1,44 \text{ мкг/м}^3$), а у подальші роки значення коливалися навколо 1 мкг/м^3 , що відповідає сучасним нормам якості повітря.

Рівні CO значно коливаються, але залишаються на низьких рівнях (максимум 3 мкг/м³ у 2013 році). З 2018 року рівень CO стабілізувався на рівні близько 1,5 мкг/м³. Концентрація О₃ незначно зросла за останні роки, з 10 мкг/м³ у 2013 році до 26,72 мкг/м³ у 2024 році. Підвищення рівня озону може бути спричинене зміною кліматичних умов, але його концентрація залишається у межах допустимих норм.

Таким чином, результати аналізу свідчать про загальне покращення якості повітря в Копенгагені, але зберігається необхідність моніторингу РМ_{2.5} та РМ₁₀, щоб уникнути можливого зростання забруднення в майбутньому.

Аналіз динаміки AQI та окремих забруднювачів моніторингової станції

Н.С. Ørsted Institutet за 2013–2024 роки дозволяє оцінити зміни якості повітря в цьому районі Копенгагена.

У період 2013–2014 років AQI залишався на відносно низькому рівні, від 22,73 у 2013 році до 26,69 у 2014 році, що відповідає категорії "Хороший" за шкалою ВООЗ, тобто якість повітря була безпечною для здоров'я більшості людей (рис. 3.3).

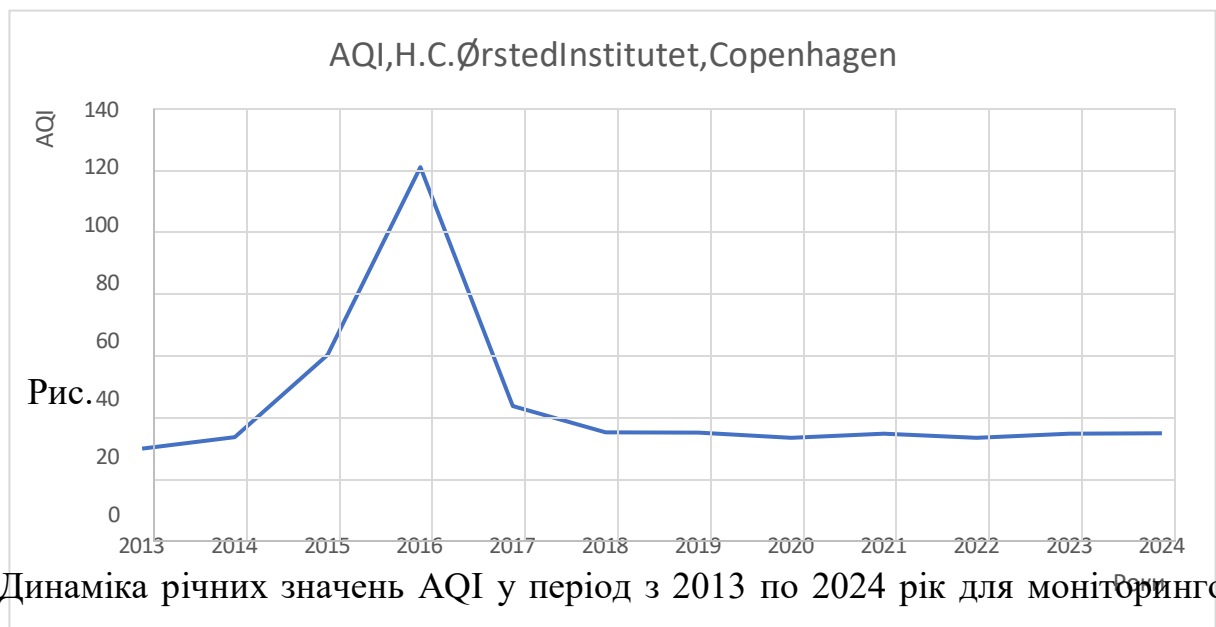


Рис. 3.3 Динаміка річних значень AQI у період з 2013 по 2024 рік для моніторингової станції Н.С. Ørsted Institutet

Найвищий рівень AQI зафіксовано у 2016 році — 120,04. Це різке підвищення перевело якість повітря до категорії "Шкідливий для чутливих груп", що свідчить про суттєве зростання забруднення та потенційну загрозу для вразливих груп населення. Після піку у 2016 році рівень AQI значно знизився і залишався стабільним у межах 26–38 протягом 2017–2024 років. Цей рівень AQI відповідає категорії "Хороший" або "Помірний", що свідчить про те, що якість повітря була прийнятною і не становила серйозної загрози для здоров'я населення.

Аналіз концентрацій основних забруднювачів (рис. 3.4) показує, що $PM_{2.5}$: Значення $PM_{2.5}$ були доступні лише для окремих років, із найбільшим рівнем у 2015 році ($52,02 \text{ мкг/м}^3$), що, ймовірно, спричинило підвищення AQI.

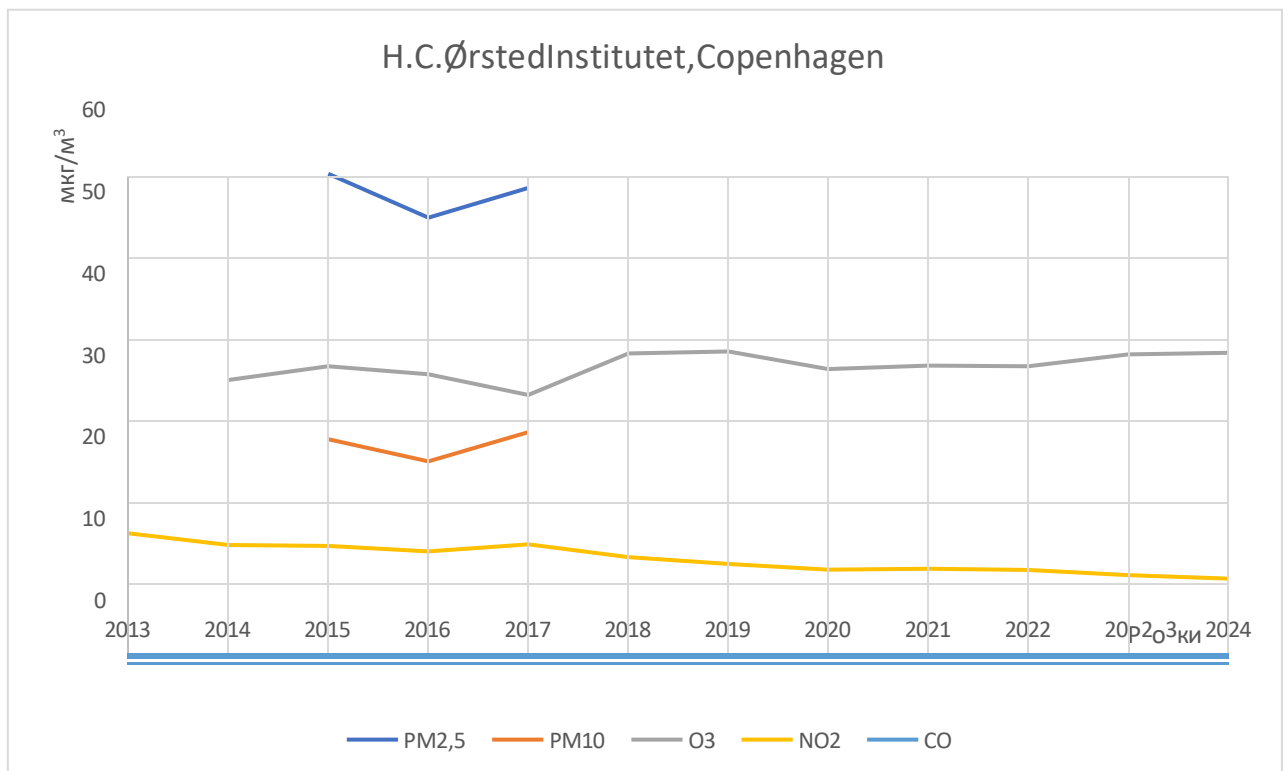


Рис.3.4 Динаміка річних значень забруднювачів атмосферного повітря у період з 2013 по 2024 рік для моніторингової станції Н.С. Ørsted Institutet

Після 2016 року дані $PM_{2.5}$ відсутні, але загальне зниження AQI свідчить про покращення цього показника. Концентрація PM_{10} варіювалася, з піками у

2015–2017 роках. У 2015 році вона становила $19,50 \text{ мкг/м}^3$, а у 2017 — $20,38 \text{ мкг/м}^3$, що є високими показниками для твердих частинок. Проте в подальші роки показники PM_{10} стабілізувалися на рівні близько $28\text{--}30 \text{ мкг/м}^3$, що вказує на зниження впливу забруднення від твердих частинок.

Рівень озону (O_3) залишається стабільним у межах $24\text{--}30 \text{ мкг/м}^3$, з незначними коливаннями. Озон досягає максимуму у 2015 році ($28,45 \text{ мкг/м}^3$), після чого залишається на відносно стабільному рівні. Високий рівень озону може бути пов'язаний із кліматичними умовами та транспортними викидами. Концентрація NO_2 знижувалася з $6,55 \text{ мкг/м}^3$ у 2014 році до $2,44 \text{ мкг/м}^3$ у 2024 році. Це свідчить про успіх заходів, спрямованих на зниження транспортних викидів та поліпшення якості повітря в місті. Концентрації CO залишалися низькими протягом усього періоду, з тенденцією до зниження з $2,00 \text{ мкг/м}^3$ у 2013 році до $1,06 \text{ мкг/м}^3$ у 2024 році. Це показник стабільно низького рівня викидів CO в цій місцевості.

Результати свідчать про покращення якості повітря в районі станції Н.С. Ørsted Institutet протягом останніх років, за винятком 2016 року, коли було зафіксовано підвищений рівень забруднення.

Загальна динаміка AQI (2013–2024) для моніторингової станції Risoe показує наступне (рис. 3.5).

У період 2013–2014 років AQI був значно вищим, досягаючи максимуму $105,53$ у 2014 році, що відповідає категорії "Шкідливий для чутливих груп" за шкалою ВООЗ. Цей період характеризувався високими рівнями $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} , що суттєво вплинуло на підвищення індексу забруднення. Після піку у 2014 році AQI поступово знижувався, досягнувши $31,05$ у 2017 році. Це зниження пов'язане з поступовим зменшенням концентрацій $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} та інших забруднювачів, що зменшило загальне навантаження на якість повітря. З 2018 року AQI стабілізувався на рівні близько $27\text{--}30$, що відповідає категорії "Хороший". Це свідчить про покращення якості повітря та відсутність суттєвих загроз для здоров'я населення в цій місцевості.

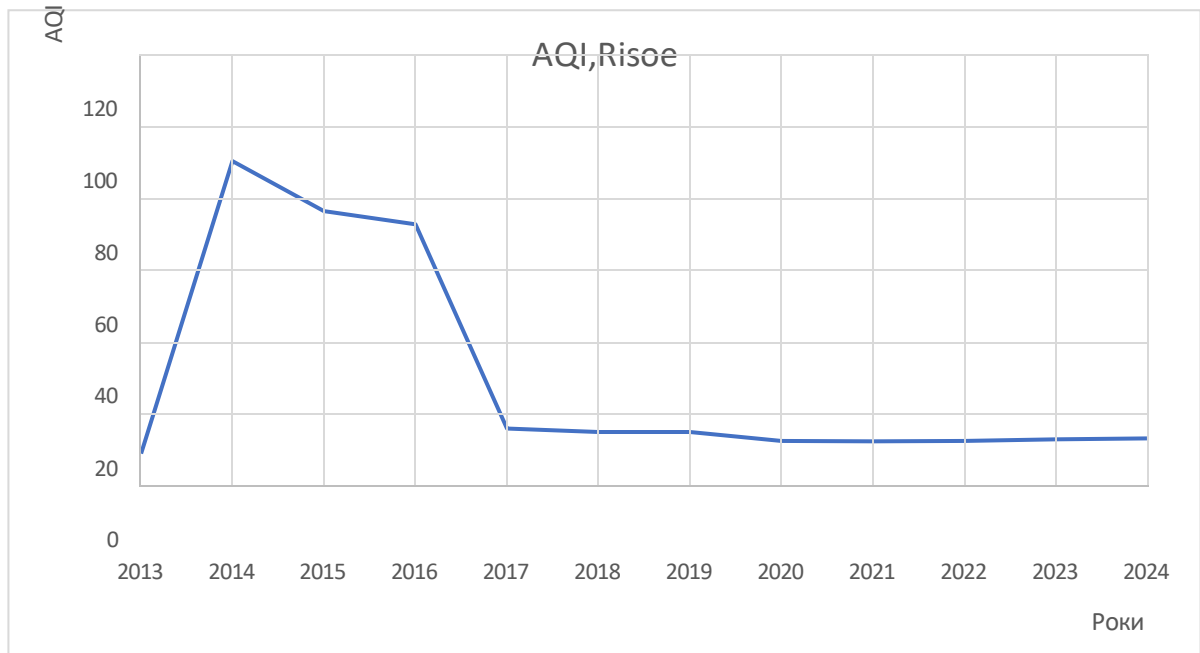


Рис. 3.5 Динаміка річних значень AQI у період з 2013 по 2024 рік для моніторингової станції Risoe

Аналіз концентрацій основних забруднювачів (рис. 3.6) показує, що рівень $PM_{2.5}$ був найбільш високим у 2014 році ($38,61 \text{ мкг/м}^3$), що суттєво вплинуло на AQI. Згодом рівень $PM_{2.5}$ почав знижуватися, досягнувши мінімуму $9,39 \text{ мкг/м}^3$ у 2022 році. Низькі рівні $PM_{2.5}$ після 2017 року свідчать про значне покращення якості повітря. Рівень PM_{10} теж знизився з $26,00 \text{ мкг/м}^3$ у 2013 році до $9,39 \text{ мкг/м}^3$ у 2022 році, з подальшим незначним зростанням до $11,63 \text{ мкг/м}^3$ у 2024 році. Загальне зниження рівня PM_{10} позитивно вплинуло на AQI.

Концентрація озону (O_3) коливалася у межах $27\text{--}30 \text{ мкг/м}^3$ протягом 2013–2024 років. Найвищий рівень був зафіксований у 2017 році — $30,03 \text{ мкг/м}^3$. Озон залишається відносно стабільним забруднювачем, що незначно впливає на AQI. Концентрація NO_2 знижувалася з $5,00 \text{ мкг/м}^3$ у 2013 році до $1,80 \text{ мкг/м}^3$ у 2024 році. Це свідчить про успіх заходів щодо зменшення викидів від транспорту та промисловості, що значно знизило вплив цього забруднювача на AQI. Рівень CO залишався стабільно низьким протягом усього аналізованого періоду, коливаючись у межах $1,0\text{--}1,3 \text{ мкг/м}^3$. Це свідчить про

відсутність значного впливу цього забруднювача на якість повітря у місцевості Risoe. Загалом, станція Risoe демонструє позитивні результати у зниженні рівня забруднення повітря, особливо у частині дрібнодисперсних частинок, що призвело до стабільно низького рівня AQI з 2018 року.

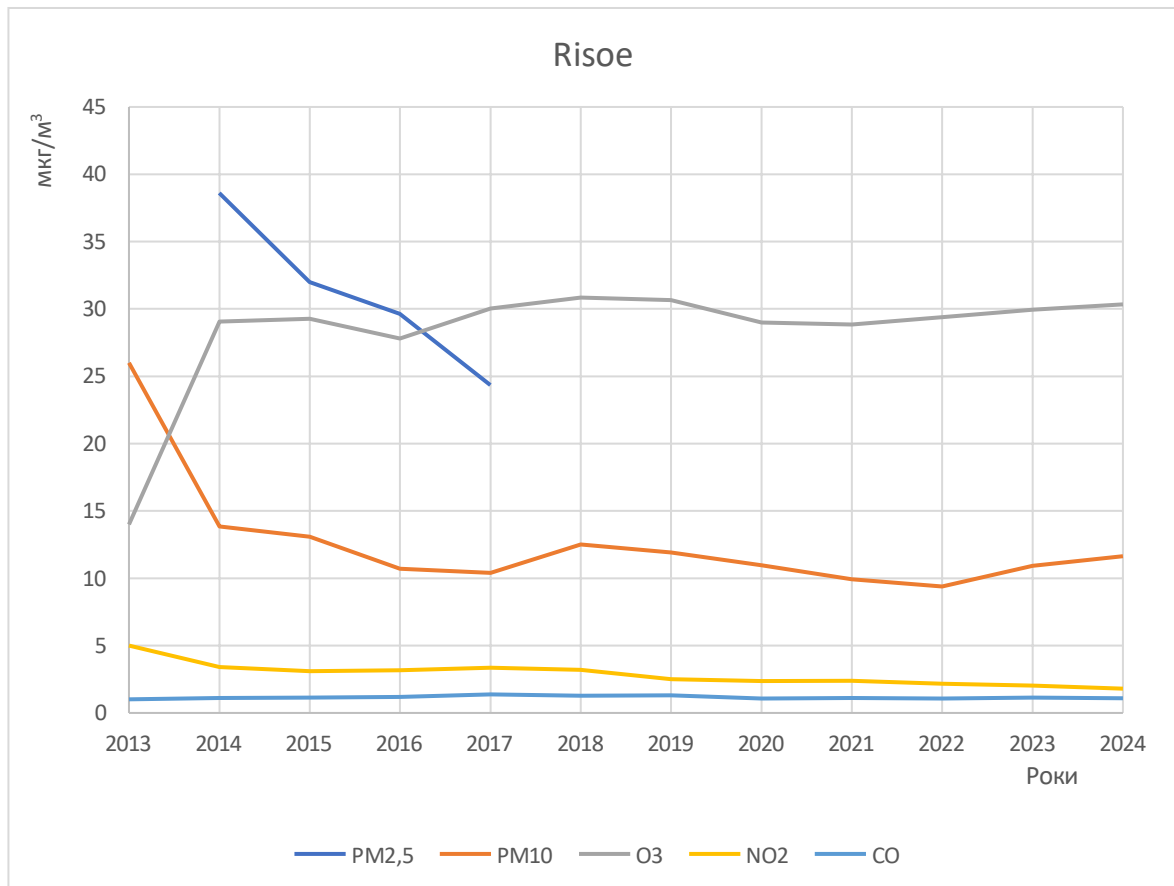


Рис.3.6 Динаміка річних значень забруднювачів атмосферного повітря у період з 2013 по 2024 рік для моніторингової станції Risoe

Встановлені просторові закономірності на основі оброблених щорічних значень AQI за період 2013–2024 рр., показують, що найвищі значення AQI систематично фіксувалися у районі Н.С. Andersens Boulevard. Середній рівень AQI у

цьому районі за весь період дослідження становив 91,2, що відповідає категорії «задовільне» з періодичним переходом до «помірного забруднення». У деякі роки (наприклад, 2014 та 2015) рівень AQI перевищував 110, що є чітким сигналом перевищення норм для чутливих груп населення. У зоні Н.С.

Ørsted Institutet середній показник AQI складав 75,4, що хоча й нижчий за центральну частину міста, однак також не завжди відповідає гігієнічним рекомендаціям ВООЗ. Тут спостерігалася позитивна динаміка зниження рівня забруднення після 2016 року. У передмісті, на станції Risoe, рівень AQI упродовж більшості років був нижчим за 50, що свідчить про чисте або добротне повітря відповідно до міжнародної шкали. Ця точка виступає як

«еталонна», демонструючи, як сильно міське середовище впливає на концентрації забруднюючих речовин.

Отримані дані свідчать про чітку просторову поляризацію якості повітря у межах міста – у центральних районах, таких як Н.С. Andersens Boulevard, повітря суттєво перевантажене оксидами азоту та частинками пилу через інтенсивний автомобільний рух, вузькі вуличні каньйони та обмежену вентиляцію. У районах з меншою щільністю забудови та наявністю дерев (як-от Н.С. Ørsted Institutet) показники AQI виявляються помітно нижчими. У зелених передмістях, де домінує природний ландшафт, рівень забруднення є мінімальним і відповідає рекомендованим нормативам ВООЗ.

Таким чином, геопросторове середовище є визначальним чинником формування якості повітря, а сам індекс AQI демонструє високу чутливість до просторових змін.

Аналіз впливу основних забруднювачів на рівень AQI

Індекс якості повітря (AQI) є інтегральним показником, що розраховується на основі концентрацій шести основних забруднюючих речовин: $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , CO та O_3 . Однак, у кожен конкретний момент значення загального AQI визначається максимальним внеском одного з поллютантів — того, чия концентрація відносно своєї нормативної шкали найбільша. Таким чином, для кожної точки спостереження кожного року

варто ідентифікувати, який саме компонент відіграє домінуючу роль у погіршенні якості повітря.

Найбільший внесок у формування підвищеного AQI протягом 2013–2016 років у центральних районах міста (особливо на станції Н.С. Andersens Boulevard) був пов'язаний з високими концентраціями $PM_{2.5}$. Наприклад, у 2014 році рівень $PM_{2.5}$ на цій локації сягав $59,82 \text{ мкг/м}^3$, що більш ніж удвічі перевищувало граничний рівень за шкалою ВООЗ. Саме цей компонент визначив $AQI = 120,56$ у зазначений період, що класифікується як «помірне забруднення» або навіть «шкідливе для чутливих груп».

Аналогічна ситуація простежується і для PM_{10} , хоча його концентрації були менш критичними. У передмісті (Risoe) середні значення $PM_{2.5}$ рідко перевищували 15 мкг/м^3 , що відноситься до категорії «добре».

NO_2 виявився другим за значущістю забруднювачем, особливо на станціях, розташованих поблизу інтенсивних транспортних магістралей. Це пояснюється тим, що головним джерелом викиду NO_2 є автомобільний транспорт, зокрема дизельні двигуни.

У роки із сезонним підвищенням інтенсивності трафіку або при несприятливих погодних умовах (інверсії, відсутність вітру) концентрації NO_2 зростали до рівнів, що формували домінуючий вплив на AQI.

На відміну від PM та NO_2 , O_3 проявляв себе не в центрі міста, а в менш урбанізованих зонах, зокрема на станції Risoe. Це пояснюється фотохімічною природою озону — він утворюється внаслідок реакцій між NO_x і леткими органічними сполуками під дією сонячного світла.

У весняно-літній період озон ставав основним фактором, що підвищував значення AQI у передмісті. Наприклад, у 2018 році AQI на Risoe досягав $51,23$ саме через концентрацію O_3 .

У більшості випадків рівень вторинних забруднювачів CO та SO_2 залишався стабільно низьким і не мав істотного впливу на загальний AQI у місті Копенгаген. В окремі періоди їхні концентрації незначно зростали, проте не сягали значень, які могли б суттєво вплинути на якість повітря. Це

пов'язано з переходом міського транспорту на екологічніші форми пального, а також відсутністю великих джерел промислових викидів у межах міста.

Аналізуючи зміни домінуючих забруднювачів у різні роки, можна визначити такі тренди: 2013–2016 – переважає вплив $PM_{2.5}$ у всіх точках, особливо в центральній частині міста;

2017–2019 – зменшення концентрацій PM , зростає роль NO_2 у зонах транспорту.

2020–2024 – після впровадження екологічних стратегій та зменшення дорожнього трафіку (включаючи пандемічні обмеження 2020–2021), концентрації NO_2 знижуються, а напередній план виходить O_3 у периферійних зонах.

Проведено кореляційний аналіз між рівнями основних забруднювачів у трьох точках. Найвищий ступінь кореляції зафіксовано між $PM_{2.5}$ та PM_{10} ($r \approx 0,89$), що свідчить про спільні джерела походження — переважно дорожній пил і викиди автотранспорту. NO_2 має помірну кореляцію з $PM_{2.5}$ ($r \approx 0,62$), тоді як озон демонструє зворотний зв'язок з NO_2 у центрі міста ($r \approx -0,48$), що підтверджує його вторинну природу та складну хімічну динаміку.

Отже, найвищий рівень забруднення повітря у місті Копенгаген спостерігається у центральній частині міста — районі Н.С. Andersens Boulevard. Проміжні значення AQI фіксуються у зоні Н.С. Ørsted Institutet, що має менше транспортне навантаження. Найнижчі значення AQI спостерігаються у передмісті (Risoe), що підтверджує залежність між щільністю забудови та чистотою повітря. Просторові відмінності якості повітря є сталими упродовж аналізованого періоду, хоча в усіх локаціях простежується поступове покращення з 2016 року.

Найбільший вплив на індекс AQI у місті Копенгаген має $PM_{2.5}$, особливо у центральних зонах із високим рівнем трафіку. NO_2 є другим за значущістю забруднювачем, пов'язаним із транспортною інфраструктурою. У передмістях ключовим компонентом у формуванні AQI виявляється озон (O_3), особливо в літні періоди. Рівень CO та SO_2 залишається стабільно низьким, що свідчить

про ефективну екологічну політику міста. Просторова динаміка забруднення демонструє зміщення «екологічного навантаження» з важких частинок у напрямку озону в останні роки.

ВИСНОВКИ

У ході проведеного дослідження встановлено, що проблема забруднення атмосферного повітря в межах міста Копенгаген залишається актуальною, особливо з огляду на просторові відмінності рівнів забруднення.

1. Огляд літератури засвідчив, що хоча загальний стан повітря в Данії оцінюється як відносно добрий, у межах окремих районів міста можуть виникати перевищення допустимих концентрацій шкідливих речовин, особливо у транспортних зонах.

2. Розглянуто методики визначення забруднення атмосферного повітря та методику розрахунку AQI. У процесі виконання роботи було використано відкриті екологічні дані з авторитетних джерел, застосовано стандартизовану методику розрахунку індексу якості повітря AQI на основі даних про основні полютанти, таких як $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , O_3 , CO та SO_2 , з урахуванням відповідної формули інтерполяції.

3. Проаналізовано відмінності у значеннях AQI між трьома різними за типом середовища районами міста: Н.С. Andersens Boulevard (центральна транспортна артерія), Ørsted Institutet (район з помірною забудовою) та Risoe (передмістя з низьким рівнем антропогенного навантаження). Найвищі показники забруднення виявлено в центрі міста, де середній річний AQI перевищував 90, що відповідає помірному рівню забруднення. Найнижчі значення зафіксовані на станції Risoe, що свідчить про позитивний вплив природного середовища на якість повітря.

4. За результатами дослідження встановлено, що найбільший внесок у підвищення рівня AQI вносять тверді частинки $PM_{2.5}$, особливо у густозабудованих зонах. У передмістях у теплі сезони спостерігається вплив озону (O_3). Оксиди азоту (NO_2) відіграють помітну роль у зонах з високою інтенсивністю транспортного руху. Інші забруднювачі, зокрема CO та SO_2 , у межах Копенгагена мали незначний вплив на загальний рівень AQI.

5. Отримані результати мають прикладне значення і можуть бути використані для оцінки ефективності міських екологічних стратегій, оптимізації розміщення моніторингових станцій, планування зелених зон та пішохідних вулиць. Робота також може слугувати базою для більш глибоких досліджень із застосуванням геоінформаційних систем або методів машинного навчання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. WHO. *Air Pollution*. World Health Organization. URL: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution> (дата звернення: 15.11.2023).
2. European Environment Agency. *Air quality in Europe — 2022 report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022>
3. Pope C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2006. Vol. 56. №6. P. 709–742. DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
4. Lelieveld J., Evans J.S., Fnais M. et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*. 2015. Vol. 525. P. 367–371. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature15371>
5. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*. 2024. URL: <https://www.airnow.gov/publications/air-quality-index/technical-assistance-document-for-reporting-the-daily-aqi/>
6. Chan C.K., Yao X. Air pollution in mega cities in China. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42. № 1. P. 1–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.003>
7. Hu X., Waller L.A., Al-Hamdan M.Z. et al. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the southeastern U.S. using geographically weighted regression. *Environmental Research*. 2013. Vol. 121. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.11.003>
8. AQICN.org. *Real-time Air Quality Index*. URL: <https://aqicn.org>.
9. Jensen S.S., Ketzler M., Becker T., Christensen J., Brandt J., Plejdrup M., Winther M., Nielsen O.-K., Hertel O., Ellermann T. High resolution multi-scale air quality modelling for all streets in Denmark // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2017. Vol. 52, Part A. P. 322–339. ISSN 1361-9209. DOI: [10.1016/j.trd.2017.02.019](https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.019)

10. Goodsite M.E. et al. Urban air quality: sources and concentrations // *Air Pollution Sources, Statutes, and Engineering Solutions*. Springer, 2020. pp193–214 DOI: [10.1007/978-1-0716-0596-7_321](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0596-7_321)
11. Manders A., Ketznel M. Regional and Urban Air Quality in Europe // *Handbook of Air Quality and Climate Change*. Springer, 2023. DOI: [10.1007/978-981-15-2527-8_14-2](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_14-2)
12. Johansson L. et al. An operational urban air quality model ENFUSER // *Environmental Modelling & Software*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105460>
13. Torkayesh A.E. et al. A comparative assessment of air quality across European countries // *Socio-Economic Planning Sciences*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101198>
14. Zhou M. et al. Changes in the concentration of air pollutants before and after the COVID-19 blockade // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. DOI: [10.1007/s11356-020-12164-2](https://doi.org/10.1007/s11356-020-12164-2)
15. Shoaib A. et al. Assessing spatial distribution and residents satisfaction for urban green spaces // *GeoJournal*. 2022. DOI: [10.1007/s10708-021-10545-9](https://doi.org/10.1007/s10708-021-10545-9)
16. Ganzleben C., Kazmierczak A. Leaving no one behind – understanding environmental inequality in Europe // *Environmental Health*. 2020. DOI: [10.1186/s12940-020-00600-2](https://doi.org/10.1186/s12940-020-00600-2)
17. Hossain M.N. et al. Spatial distribution and diurnal variation of air pollutants // *Discover Sustainability*. 2025. DOI: [10.1007/s44292-025-00031-z](https://doi.org/10.1007/s44292-025-00031-z)
18. Palència L. et al. Urban design, health and equity // *BMC Public Health*. 2025. DOI: [10.1186/s12889-025-21835-z](https://doi.org/10.1186/s12889-025-21835-z)
19. Imam M. et al. Air quality monitoring using statistical learning models for sustainable environment // *Intelligent Systems with Applications*. 2024. № 17. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200333>
20. Fung P.L., Sillanpää S., Niemi J. V., Kousa A., Timonen H., Zaidan M. A., Saukko E., Kulmala M., Petäjä T., Hussein T. Improving the current air quality index with new particulate indicators using a robust statistical approach // *Science of The*

Total Environment. 2022. Vol. 844. Article 157099. ISSN 0048-9697. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.157099](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157099)

21. Castell N., Schneider P., Grossberndt S., Fredriksen M.F., Sousa-Santos G., Vogt M., Bartonova A. Localized real-time information on outdoor air quality at kindergartens in Oslo, Norway using low-cost sensor nodes // *Environmental Research*. 2018. Vol. 165. P. 410–419. ISSN 0013-9351. DOI: [10.1016/j.envres.2017.10.019](https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.019)

22. Nakhjiri A., Kakroodi A.A. Air pollution in industrial clusters: A comprehensive analysis and prediction using multi-source data // *Ecological Informatics*. 2024. Vol. 80. Article 102504. ISSN 1574-9541. DOI: [10.1016/j.ecoinf.2024.102504](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102504)

23. Singh J. et al. Air Quality and Human Health // *Environmental Pollution Modeling: Analysis and Trends*. Springer, 2023. DOI: [10.1007/978-3-031-45300-7_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-45300-7_13)

24. Willberg E. et al. Cyclists' exposure to air pollution, noise, and greenery: a population-level spatial analysis approach // *Int. Journal of Health Geographics*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12942-023-00326-7>

25. Bougiatioti A. et al. Air quality in European cities // *Comprehensive Analytical Chemistry*, Elsevier. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.03.018>

26. Jephcote C. et al. Changes in air quality during COVID-19 lockdown in the United Kingdom // *Environmental Pollution*. 2021. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.116011](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116011)

27. Dimitriou K. et al. Assessing air quality with regard to human health in the EU through AQI // *Ecological Indicators*. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.11.023>

28. Taj T. et al. Long-term residential exposure to air pollution and Hodgkin lymphoma risk in Denmark // *Cancer Causes & Control*. 2021. DOI: [10.1007/s10552-021-01446-w](https://doi.org/10.1007/s10552-021-01446-w)

29. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій у 2018 році. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. – Київ, 2019. – 50 с.
30. Turner D. Bruce. Atmospheric dispersion estimates / Turner D. Bruce. – Lewis Publishers, 1994. – 90 p.