

© П.К. Ломазов<sup>1</sup>, А.В. Павличенко<sup>1</sup>, Ю.В. Бучавий<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ СТАЦІОНАРНИХ ПОСТІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА АТМОСФЕРНИМ ПОВІТРЯМ В АГЛОМЕРАЦІЯХ

© P. Lomazov<sup>1</sup>, A. Pavlychenko<sup>1</sup>, Yu. Buchaviy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## OPTIMISATION AND IMPROVEMENT OF THE TECHNICAL EQUIPMENT OF STATIONARY AIR MONITORING STATIONS IN AGGLOMERATIONS

**Мета.** Аналіз та розробка інноваційних підходів до оптимізації та удосконалення технічного устаткування стаціонарних постів спостереження за атмосферним повітрям в агломераціях.

**Методика досліджень.** Для вирішення завдань застосовувались наступні методи досліджень: математичного моделювання - для створення моделі розсіювання забруднюючих речовин; системного аналізу – для впровадження новітніх технологій в моніторинг якості повітря; конкретизації - для розгляду впровадження сучасних автоматизованих систем та сенсорів; узагальнення - для інтеграції аспектів впровадження технологій.

**Результати досліджень.** Дослідження показали, що впровадження новітніх сенсорних технологій підвищить точність вимірювань забруднювальних речовин. Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) покращить зв'язок з центрами обробки даних, забезпечуючи швидку передачу інформації. Оптимізація розташування постів з використанням геопросторового аналізу засобами ГІС дозволить ефективніше охоплювати зони забруднення. Впровадження енергоефективних технологій зменшить енергоспоживання приладів на постах спостереження, а алгоритми обробки даних покращать прогнозування та ефективність моніторингу.

**Наукова новизна.** Визначено кількість населення за адміністративними районами агломерації м. Дніпро, що перебуває в зоні покриття мережі постів регіонального центру гідрометеорології (РЦГМ), де дані про якість повітря вважаються достовірними за критерієм просторового розподілу. Запропонований підхід на основі геопросторового аналізу засобами ГІС дозволяє визначити мінімальну та достатню кількість додаткових постів спостереження. Обґрунтовано схему оцінки ефективності систем моніторингу якості повітря із застосуванням сенсорів та IoT, що підвищить точність вимірювань, швидкість інформування населення.

**Практичне значення.** Підвищення точності та оперативності моніторингу якості повітря сприятиме кращому контролю за забрудненням і покращенню здоров'я населення. Впровадження технологій та оптимізація системи моніторингу дозволить швидше реагувати на екологічні загрози.

**Ключові слова:** агломерація, моніторинг, сенсор, геоінформаційні системи, аналізатор, Інтернет речей, машинне навчання, штучний інтелект.

**Вступ.** У сучасних умовах швидкого розвитку промисловості та урбанізації значення моніторингу атмосферного повітря набуває особливої актуальності. Забруднення повітря є однією з найсерйозніших екологічних проблем, що негативно впливає на здоров'я населення та стан навколишнього середовища. Ефективний контроль за якістю атмосферного повітря в агломераціях вимагає наявності сучасних стаціонарних постів спостереження, які забезпечують точне та своєчасне отримання даних про концентрацію шкідливих речовин.

В умовах зростаючих вимог до якості моніторингових даних постає необхідність оптимізації та удосконалення технічного устаткування стаціонарних постів спостереження. Інтеграція новітніх технологій, впровадження автоматизованих систем збору та обробки даних, а також поліпшення методологічної бази є ключовими факторами, що сприяють підвищенню ефективності системи моніторингу атмосферного повітря. Це дозволяє не лише більш оперативно реагувати на екологічні загрози, але й здійснювати прогнозування та попередження негативних наслідків для здоров'я населення та навколишнього середовища.

Тож, устаткування стаціонарних постів спостереження за атмосферним повітрям в агломераціях, є надзвичайно важливими для забезпечення сталого розвитку та екологічної безпеки сучасних урбанізованих територій.

**Основні результати.** Традиційно для агломерації м. Дніпро спостерігається перевищення приземних концентрацій забруднювальних речовин від викидів промислових підприємств та автотранспорту.

На сьогодні єдиним суб'єктом моніторингу атмосферного повітря для агломерації м. Дніпро є Дніпропетровський регіональний центр гідрометеорології, який систематично визначає концентрації забруднювальних речовин на 6 стаціонарних постах.

Згідно з документами МВС України від 21.04.2021 р. № 300 «Порядок розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях» та вимогам Постанові КМУ № 827 від 14.08.2019 р інформація про якість атмосферного повітря зберігає свою актуальність для населення, що мешкає на відстані до 3 км від постів спостереження. Це обумовлено насамперед складними процесами поширення забруднювальних речовин в атмосферному повітрі та пересіченою місцевістю із щільною житловою забудовою, тому для якісної просторової інтерполяції моніторингових даних кількість постів спостереження як і характер їх розташування є важливим. Картографування агломерації м. Дніпро щодо зон отримання актуальних даних про якість повітря з мережі постів РЦГМ (рис. 1).

Щільність населення агломерації м. Дніпро значно вварюється за адміністративними районами: від 2000 осіб на км<sup>2</sup> для Самарського району та до 10000 осіб на км<sup>2</sup> для Центрального. За допомогою інструментів зональної статистики розподілу площ та кількості населення що знаходиться в зоні актуальних даних про якість повітря, табл. 1.

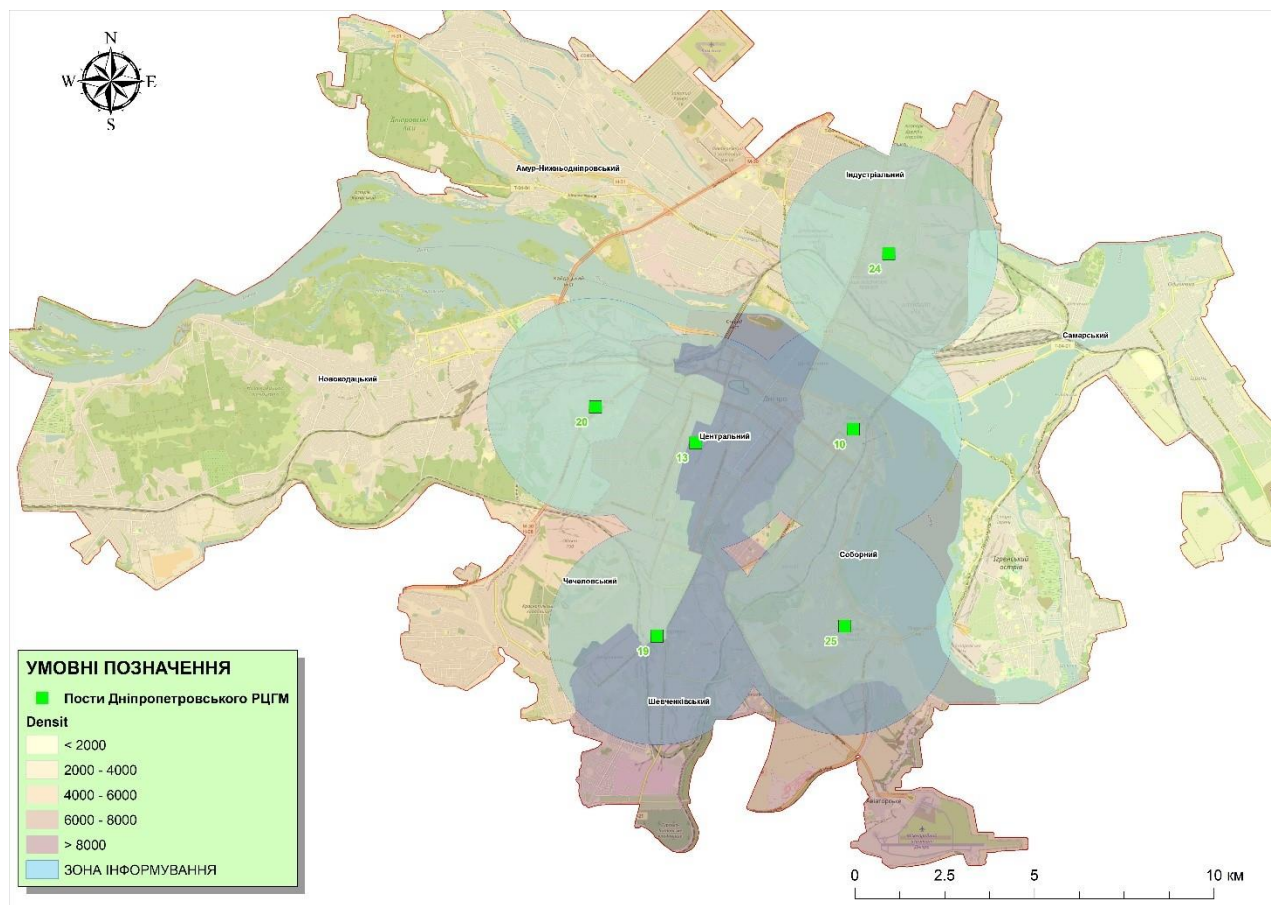


Рис. 1. Картографування агломерації м. Дніпро щодо зон отримання актуальних даних про якість повітря з мережі постів РЦГМ

Таблиця 1

Зонально-статистичний аналіз розподілу площ та кількості населення що знаходиться в зоні актуальних даних про якість повітря з мережі постів РЦГМ

РАЙОН	Населення, осіб	Загальна площа, м <sup>2</sup>	Середня щільність, осіб на км <sup>2</sup>	Зона покриття постами моніторингу (де інформація є достовірною)		Розрахункова кількість населення в зоні роботи постів моніторингу, %
				м <sup>2</sup>	%	
Центральний	58852	5935182	9916	5031500	84,8	49906
Чечеловський	114171	21436769	5326	12259400	57,2	65306
Індустріальний	126665	21770356	5818	12065000	55,4	70172
Шевченківський	142119	17358609	8187	14284300	82,3	116964
Соборний	159709	25104917	6362	22712200	90,5	144537
Амур-Нижньодніпровський	144852	39952211	3626	3766500	9,4	13616
Новокодацький	164039	50931169	3221	10790500	21,2	34776
Самарський	73429	38862074	1889	2966800	7,6	5581
	983836					500858

Таким чином встановлено, що лише біля 50% населення агломерації м. Дніпро має достовірну інформацію про якість атмосферного повітря з мережі постів РЦГМ. У зв'язку з цим виникає необхідність в обґрунтуванні місць розташування додаткових постів спостереження з урахуванням щільності населення та типів постів за призначенням (промисловий, транспортний, фоновий). Шляхом моделювання геопросторових даних засобами ГІС-технологій визначено, що розрахункова мінімальна кількість таких додаткових постів для агломерації м. Дніпро складає від 9 до 12.

Іншою задачею є удосконалення технічного оснащення постів спостереження на основі газоаналізаторів безперервної дії та системи інформування населення з урахуванням сучасних цифрових технологій, міжнародного досвіду з моніторингу тощо.

Першочерговим завданням оптимізації технічного устаткування є підвищення точності та надійності вимірювальних приладів. Сучасні стаціонарні пости мають бути оснащені високоточними сенсорами, здатними виявляти навіть мінімальні концентрації забруднювачів. Це забезпечить можливість раннього виявлення критичних рівнів забруднення і вживання оперативних заходів для їх зниження. Важливим аспектом є також калібрування приладів та регулярне технічне обслуговування, що дозволяє зберігати високу точність вимірювань протягом тривалого часу [1].

Сучасні системи моніторингу атмосферного повітря включають різноманітне устаткування, яке дозволяє вимірювати концентрації широкого спектру забруднюючих речовин. Це устаткування можна класифікувати на основі принципів роботи, технічних характеристик та призначення:

#### 1. Сенсори та аналізатори газів:

Електрохімічні сенсори: використовуються для визначення концентрацій таких газів, як озон ( $O_3$ ), оксид вуглецю ( $CO$ ), діоксид азоту ( $NO_2$ ), діоксид сірки ( $SO_2$ ). Вони працюють за принципом електрохімічної реакції, яка виробляє електричний сигнал, пропорційний концентрації газу.

Оптичні сенсори: використовують спектрофотометричні методи, такі як ультрафіолетова (UV) та інфрачервона (IR) спектроскопія, для визначення концентрацій озону, метану ( $CH_4$ ), оксидів азоту ( $NO_x$ ) та інших газів.

Газові хроматографи: забезпечують високу точність та чутливість до великої кількості органічних та неорганічних сполук. Використовуються для детального аналізу вуглеводнів та летких органічних сполук (ЛОС).

#### 2. Аерозольні монітори:

Оптичні та лазерні денситометри: використовують розсіювання світла для визначення концентрації часток у повітрі, таких як  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$ .

Мас-спектрометри: застосовуються для аналізу складу аерозольних часток, дозволяючи визначити їх хімічний склад та джерела походження.

#### 3. Метеорологічні станції:

Вимірювання параметрів, таких як температура, вологість, швидкість та напрямок вітру, що є важливими для моделювання та прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин.

4. Інтегровані автоматизовані системи:

Сучасні стаціонарні пости оснащуються комплексними системами, що поєднують різні типи сенсорів і аналізаторів, автоматизовані системи збору, передачі та обробки даних [2].

Оцінка ефективності систем моніторингу атмосферного повітря базується на кількох ключових критеріях, що зазначені в таблиці 2.

Таблиця 2

Оцінка ефективності систем збору та обробки даних про якість атмосферного повітря

<b>Критерій</b>	<b>Опис</b>	<b>Переваги</b>	<b>Недоліки</b>
Точність і надійність вимірювань	Використання високоякісних сенсорів та регулярне калібрування	Висока точність даних	Можливе зниження точності в складних погодних умовах
Часова та просторова роздільна здатність	Можливість отримання даних в режимі реального часу	Широке охоплення території та можливість відстежувати динаміку змін	Залежність від кількості та розташування стаціонарних постів
Автоматизація та інтеграція даних	Зниження трудомісткості та підвищення ефективності	Комплексний аналіз та моделювання	Необхідність наявності сучасного програмного забезпечення
Прогностичні можливості	Прогнозування поширення забруднюючих речовин	Можливість попередження населення та вжиття заходів	Складність та обмеженість точності прогнозів
Доступність та інформативність даних	Відкритий доступ до даних для населення	Підвищення рівня обізнаності та залучення громадськості	Необхідність забезпечення зручного доступу та візуалізації даних

Важливо зазначити, що жодна система моніторингу не є абсолютно бездоганною. Ефективність кожної системи залежить від комплексу факторів, таких як використовувані технології, фінансування, кваліфікація персоналу та чітко визначені цілі моніторингу [3].

Вибір місць розташування стаціонарних постів моніторингу атмосферного повітря є ключовим аспектом для забезпечення повного та точного охоплення

зони спостереження. Цей процес включає аналіз кількох факторів і застосування різних методологічних підходів. Перш за все, важливим є аналіз джерел забруднення. Це передбачає інвентаризацію всіх значущих джерел забруднення, включаючи промислові підприємства, транспортні магістралі, будівельні майданчики та інші антропогенні джерела, а також кількісний аналіз викидів від кожного джерела для оцінки обсягів та складу забруднюючих речовин.

Географічні та кліматичні фактори також відіграють важливу роль у виборі місць розташування постів. Необхідно враховувати рельєф місцевості, оскільки гірські масиви, долини та інші географічні утворення можуть впливати на розповсюдження забруднюючих речовин. Локальні кліматичні умови, такі як напрямок і швидкість вітру, температура, вологість та атмосферний тиск, також суттєво впливають на дисперсію та концентрацію забруднень.

Просторовий аналіз та моделювання є ще одним важливим аспектом. Геоінформаційні системи (ГІС) дозволяють здійснювати просторовий аналіз даних про джерела забруднення, топографію та метеорологічні умови, створюючи моделі розповсюдження забруднюючих речовин та визначаючи оптимальні місця розташування постів. Математичне моделювання, зокрема моделі дисперсії, допомагає прогнозувати концентрації забруднюючих речовин у різних точках агломерації.

Одним з прикладів використання математичного моделювання є система AERMOD (рис. 2), розроблена Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA). AERMOD використовує метеорологічні дані та інформацію про джерела викидів для прогнозування концентрацій забруднюючих речовин на місцевому рівні. Інший приклад – моделі CMAQ (Community Multiscale Air Quality), які застосовуються для регіонального і національного моделювання якості повітря, враховуючи складні фізико-хімічні процеси в атмосфері [4].

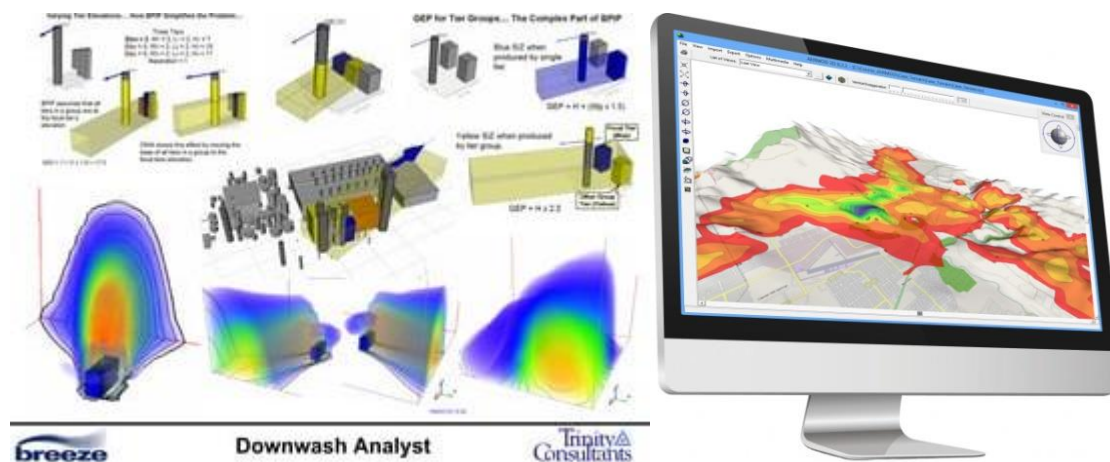


Рис. 2. Система AERMOD для розрахунку максимальних щогодинних, добових та річних концентрації забруднювальних речовин

При виборі місць розташування постів необхідно дотримуватись нормативних вимог національних та міжнародних стандартів щодо моніторингу якості повітря. Це включає забезпечення репрезентативності даних для оцінки якості

повітря в усьому районі спостереження. Соціально-економічні фактори також є важливими: слід враховувати щільність населення і розташування постів у районах з високою щільністю населення для оцінки впливу забруднення на здоров'я людей, а також поблизу шкіл, лікарень та інших установ, де перебувають вразливі групи населення.

Технічні та економічні обмеження також впливають на вибір місць розташування постів. Необхідно враховувати технічну можливість встановлення постів у вибраних місцях, включаючи наявність електроживлення та зв'язку, а також економічну доцільність розташування постів, зокрема витрати на установку, експлуатацію та технічне обслуговування.

Регулярний аналіз даних з постів моніторингу дозволяє оцінювати ефективність їх розташування та необхідність коригування. Адаптивне управління, яке передбачає використання отриманих даних для динамічного коригування місць розташування постів у відповідь на зміну умов та нові джерела забруднення, є важливим аспектом забезпечення ефективного моніторингу якості повітря [5].

*Використання автоматизованих систем та сенсорів для реєстрації забруднюючих речовин.* Сучасні технології моніторингу атмосферного повітря значно розвинулися завдяки впровадженню автоматизованих систем та високочутливих сенсорів. Автоматизація дозволяє не лише підвищити точність і надійність вимірювань, але й забезпечує безперервний моніторинг у режимі реального часу.

Автоматизовані системи складаються з різноманітних типів сенсорів, які можуть одночасно вимірювати концентрації кількох забруднюючих речовин. Серед таких сенсорів виділяють електрохімічні сенсори, що використовуються для вимірювання концентрацій газів, таких як озон ( $O_3$ ), оксид вуглецю (CO), діоксид азоту ( $NO_2$ ), та діоксид сірки ( $SO_2$ ). Ці сенсори працюють на основі електрохімічних реакцій, що генерують електричний сигнал, пропорційний концентрації відповідного газу.

Оптичні сенсори, такі як спектрофотометричні пристрої (рис. 3), використовують ультрафіолетову (UV) та інфрачервону (IR) спектроскопію для визначення концентрацій газів. Ці сенсори дозволяють здійснювати високоточні вимірювання в режимі реального часу. Наприклад, лазерні денситометри та мас-спектрометри використовуються для аналізу аерозольних часток, таких як PM2.5 та PM10, забезпечуючи високу точність і чутливість вимірювань.

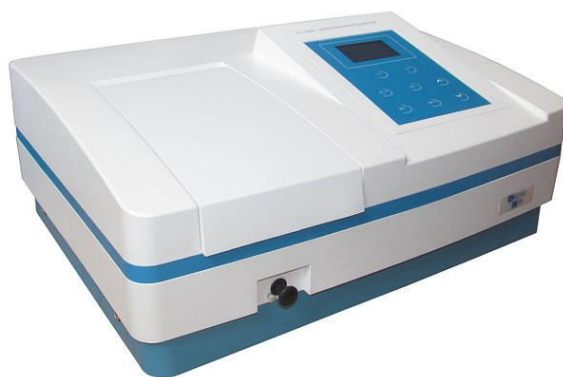


Рис. 3. Спектрофотометр для вимірювання концентрацій пилу та газів

Автоматизовані системи мають перевагу в тому, що вони можуть самостійно здійснювати калібрування та діагностику, що значно знижує потребу у втручанні оператора і підвищує надійність даних. Використання таких систем дозволяє отримувати великі обсяги даних, які можуть бути використані для аналізу тенденцій, прогнозування та прийняття рішень у сфері охорони навколишнього середовища [6].

*Інтеграція IoT (Інтернет речей) для поліпшення зв'язку між постами та центром обробки даних.* Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) у системи моніторингу атмосферного повітря відкриває нові можливості для поліпшення ефективності та точності моніторингу. IoT дозволяє створити мережу взаємопов'язаних сенсорів і пристроїв, які можуть обмінюватися даними в режимі реального часу.

Застосування IoT-технологій забезпечує безперервний зв'язок між стаціонарними постами моніторингу та центрами обробки даних. Кожен пост обладнаний сенсорами, які збирають дані про концентрації забруднюючих речовин і передають їх у центральний вузол через бездротові мережі, такі як Wi-Fi, 4G / 5G або спеціалізовані мережі LPWAN (Low Power Wide Area Network). Цей підхід значно знижує затримки у передачі даних та забезпечує оперативність їх обробки.

Однією з основних переваг IoT є можливість здійснювати віддалений контроль та управління сенсорами. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни умов навколишнього середовища, проводити дистанційне калібрування та діагностику обладнання. Крім того, IoT-системи можуть бути інтегровані з аналітичними платформами, які використовують методи машинного навчання та штучного інтелекту для аналізу великих обсягів даних. Це сприяє більш точному прогнозуванню концентрацій забруднюючих речовин і виявленню аномалій.

Тож, впровадження IoT у системи моніторингу атмосферного повітря дозволяє створити ефективну та надійну інфраструктуру, яка забезпечує високу точність вимірювань, оперативність передачі та обробки даних, а також можливість швидкої адаптації до нових викликів у сфері охорони навколишнього середовища [7].

Створення відкритих платформ для доступу до даних про стан повітря в режимі реального часу є важливим напрямком удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря. Відкриті платформи забезпечують широкий доступ до актуальної інформації про якість повітря, що сприяє підвищенню прозорості та обізнаності громадськості. Такі платформи дозволяють інтегрувати дані з різних джерел, включаючи автоматизовані системи та сенсори, що збирають інформацію у реальному часі. Це не лише покращує можливості для досліджень та аналізу, але й стимулює громадян до активної участі в заходах щодо покращення якості повітря. Відкритий доступ до даних сприяє кращому прийняттю рішень на основі даних, а також підтримує інновації у сфері екологічного моніторингу та управління [3].

Важливо зазначити, що з розвитком технологій та збільшенням кількості сенсорів для моніторингу атмосферного повітря обсяг зібраних даних значно зростає. Це вимагає розробки ефективних алгоритмів для обробки великих масивів



даних (Big Data). Нові алгоритми повинні забезпечувати високу швидкість обробки, точність аналізу та можливість прогнозування. Основні напрямки розробки нових алгоритмів включають використання методів машинного навчання, аналізу даних у реальному часі, та паралельних обчислень.

Машинне навчання (ML) і штучний інтелект (AI) відіграють ключову роль в обробці та аналізі великих обсягів даних. Використання ML-алгоритмів дозволяє виявляти приховані закономірності та тенденції у даних про якість повітря, що неможливо зробити за допомогою традиційних методів:

Регресійні моделі: алгоритми, такі як лінійна регресія, поліноміальна регресія та метод найменших квадратів, використовуються для прогнозування концентрацій забруднюючих речовин на основі історичних даних.

Класифікаційні моделі: алгоритми, такі як дерева рішень, метод опорних векторів (SVM) та нейронні мережі, застосовуються для класифікації рівнів забруднення та ідентифікації джерел забруднень.

Глибоке навчання: використання нейронних мереж із великою кількістю шарів (глибокі нейронні мережі) для обробки комплексних даних та прогнозування складних взаємозв'язків між різними факторами, що впливають на якість повітря [6].

Забезпечення обробки даних у реальному часі є критично важливим для оперативного реагування на зміни в якості повітря. Це вимагає розробки алгоритмів, здатних обробляти дані з високою швидкістю:

Стримінгові платформи: використання платформ для обробки поточкових даних, таких як Apache Kafka, Apache Flink або Apache Storm, дозволяє обробляти дані в режимі реального часу, забезпечуючи швидку реакцію на зміну умов.

Для інформування населення щодо стану атмосферного повітря та небезпеки для здоров'я доцільно представляти моніторингову вихідну інформацію за допомогою технологій web-картографування зокрема програмного забезпечення з відкритим кодом як от GeoServer або MapServer, що реалізують протоколи передачі геопросторової інформації у форматах WMS та WFS.

Онлайн-алгоритми навчання: алгоритми, які можуть навчатися на даних, що надходять постійно, і оновлювати свої моделі у реальному часі. Це включає стохастичний градієнтний спуск та інші адаптивні методи навчання [8].

Математичні моделі для прогнозування забруднення повітря є критично важливими інструментами для оцінки і контролю якості повітря в агломераціях. Основні моделі включають диференціальні рівняння, які описують динаміку концентрацій забруднюючих речовин у просторі та часі. Наприклад, Гаусові моделі дисперсії забруднюючих речовин використовуються для оцінки їх концентрації на основі даних про джерела викидів та метеорологічні умови. Такі моделі дозволяють прогнозувати концентрації шкідливих речовин у різних точках агломерації, що є основою для прийняття рішень щодо заходів зниження забруднення.

Гаусові моделі дисперсії широко використовуються для опису розсіювання забруднюючих речовин від точкових джерел. Ці моделі ґрунтуються на

припущенні, що концентрація забруднюючої речовини в просторі має нормальний (Гаусів) розподіл.

Основне рівняння для концентрації забруднюючої речовини  $C$  в точці з координатами  $(x, y, z)$  у просторі можна записати у вигляді формули:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (1)$$

де  $Q$  – швидкість викиду забруднюючої речовини, г/с;  $u$  – швидкість вітру на висоті джерела викиду, м/с;  $\sigma_y$  та  $\sigma_z$  – параметри дисперсії в напрямках  $y$  та  $z$ , відповідно, м;  $H$  – висота джерела викиду, м.

Ця модель передбачає, що концентрація забруднюючої речовини має нормальний (Гаусів) розподіл у горизонтальному та вертикальному напрямках відносно джерела [2].

На сьогоднішній день актуальним питанням є також впровадження енергоефективних технологій для удосконалення технічного устаткування стаціонарних постів спостереження за атмосферним повітрям. Енергоефективні технології забезпечують зниження споживання енергії при збереженні або підвищенні продуктивності обладнання. Це включає використання сучасних сенсорів з низьким енергоспоживанням, автоматизованих систем управління, що оптимізують роботу обладнання, та застосування передових матеріалів, що мають кращі теплоізоляційні властивості.

Одним з напрямків підвищення енергоефективності є інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна і вітрова енергія. Використання сонячних панелей для забезпечення електроенергією стаціонарних постів моніторингу дозволяє зменшити залежність від традиційних енергетичних ресурсів і знизити викиди парникових газів. Вітрові турбіни можуть бути ефективним доповненням у регіонах з достатніми вітровими ресурсами. Інтеграція акумуляторних систем дозволяє зберігати надлишкову енергію, забезпечуючи безперебійне функціонування обладнання навіть в умовах нестабільних енергетичних поставок [5].

Оцінка екологічного впливу технічного устаткування є необхідним етапом для забезпечення екологічної безпеки. Цей процес включає аналіз життєвого циклу обладнання, який охоплює всі етапи – від видобутку сировини і виробництва, до експлуатації та утилізації. Аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) дозволяє виявити ключові етапи, що мають найбільший екологічний вплив, та розробити заходи для його мінімізації.

На етапі виробництва важливо враховувати вибір матеріалів, що мають менший вуглецевий слід та менше забруднюють навколишнє середовище. Наприклад, використання матеріалів з високим рівнем переробки або таких, що легко піддаються вторинній переробці, сприяє зниженню негативного впливу на довкілля.

Під час експлуатації технічного устаткування важливо мінімізувати викиди шкідливих речовин і забезпечити безпечне функціонування систем. Це включає регулярне технічне обслуговування та контроль за дотриманням екологічних

стандартів. Крім того, впровадження технологій для збору та утилізації відходів, що виникають під час роботи обладнання, сприяє зменшенню його негативного впливу на навколишнє середовище.

На етапі утилізації важливо забезпечити безпечне розбирання обладнання та повторне використання його компонентів. Розробка та впровадження програм для збору відпрацьованого устаткування та його переробки сприяє зменшенню кількості відходів та зниженню потреби у видобутку нових ресурсів.

Таким чином, використання енергоефективних технологій та відновлюваних джерел енергії, разом з оцінкою екологічного впливу технічного устаткування, є важливими складовими для забезпечення сталого розвитку та екологічної безпеки стаціонарних постів спостереження за атмосферним повітрям. Це дозволяє не лише підвищити ефективність моніторингу, але й зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, сприяючи збереженню природних ресурсів і поліпшенню екологічної ситуації в регіоні [9].

**Висновки.** Оптимізація та удосконалення технічного устаткування стаціонарних постів спостереження за атмосферним повітрям в агломераціях є важливим завданням для підвищення ефективності системи моніторингу. Сучасні стаціонарні пости спостереження повинні бути оснащені високоточними сенсорами, автоматизованими системами збору та обробки даних, а також інтегрованими програмними комплексами для моделювання та прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин.

Впровадження новітніх технологій, таких як Інтернет речей (IoT), машинне навчання (ML) та штучний інтелект (AI), дозволяє значно підвищити ефективність моніторингу, забезпечуючи оперативність отримання даних, їх точну обробку та можливість прогнозування негативних наслідків для здоров'я населення та довкілля. Важливим аспектом є також оптимізація технічного устаткування з точки зору енергоефективності та екологічного впливу.

Використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, а також впровадження принципів циркулярної економіки при проектуванні, виробництві та утилізації обладнання, дозволяє мінімізувати негативний вплив на довкілля та сприяти сталому розвитку систем моніторингу атмосферного повітря. Завдяки постійному вдосконаленню та оптимізації систем моніторингу атмосферного повітря можна суттєво покращити екологічну ситуацію в агломераціях, знизити рівень забруднення та його негативний вплив на здоров'я людей, а також сприяти збереженню довкілля для майбутніх поколінь.

Подальші дослідження у сфері моніторингу атмосферного повітря мають бути спрямовані на розробку і впровадження більш ефективних та точних методів збору і аналізу даних. Це включає вдосконалення існуючих технологій сенсорів та автоматизованих систем, а також розробку нових алгоритмів для обробки великих обсягів даних у режимі реального часу.

Перспективним напрямком є подальша інтеграція системи моніторингу з відкритими платформами для забезпечення широкого доступу до даних про стан повітря. Це сприятиме підвищенню прозорості, обізнаності громадськості та залученню громадян до заходів з покращення якості повітря.

Дослідження у сфері використання відновлюваних джерел енергії для забезпечення роботи моніторингових систем також мають значний потенціал. Розробка більш ефективних та економічно доцільних рішень у цій галузі дозволить зменшити енергоспоживання та знизити вплив на навколишнє середовище.

#### Перелік посилань

1. Що таке пост моніторингу якості повітря і для чого він потрібен місту? (2024). *Ecoclub Rivne*. [https://ecoclubrivne.org/air\\_quality\\_monitoring\\_post/](https://ecoclubrivne.org/air_quality_monitoring_post/)
2. Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G. S. W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A. K. H., Louie, P. K. K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., ... Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, 116, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
3. *Urban Air Pollution Monitoring*. (2024). aeroqual. <https://www.aeroqual.com/air-monitoring-products/outdoor-air-quality-monitors/urban-air-monitoring>
4. Idir, Y. M., Orfila, O., Judalet, V., Sagot, B., & Chatellier, P. (2021). Mapping Urban Air Quality from Mobile Sensors Using Spatio-Temporal Geostatistics. *Sensors*, 21(14), 4717. <https://doi.org/10.3390/s21144717>
5. Murena, F., & Salizzoni, P. (2021). Air Quality and Sustainable Development of Urban Agglomerations in the Mediterranean Area: Science, Technology and Policies. *Atmosphere*, 12(4), 487. <https://doi.org/10.3390/atmos12040487>
6. Janusz, B., Szymoniak, S., & Pasternak, K. (2024). An IoT system for air pollution monitoring with safe data transmission. *Sensors*, 24 (2). <https://doi.org/10.3390/s24020445>
7. Martín-Baos, J. Á., Rodríguez-Benitez, L., García-Ródenas, R., & Liu, J. (2022). IoT based monitoring of air quality and traffic using regression analysis. *Applied Soft Computing*, 115, 108282. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108282>
8. Ангурець, О., Хазан, П., & Колесникова, К. (2021). *Управління якістю атмосферного повітря: від концепції до впровадження: Звіт за результатами досліджень у редакції М. Сороки*. Прага-Київ: Arnika.
9. Gozzi, F., Della Ventura, G., & Marcelli, A. (2016). Mobile monitoring of particulate matter: State of art and perspectives. *Atmospheric Pollution Research*, 7(2), 228–234. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.09.007>

#### ABSTRACT

**Goal.** To analyze and develop innovative approaches to optimization and improvement of technical equipment of stationary air monitoring stations in agglomerations.

**Methodology.** To solve the problems, the following research methods were used: mathematical modeling - to create a model of pollutant dispersion; system analysis - to introduce the latest technologies in air quality monitoring; specification – to consider the introduction of modern automated systems and sensors; generalization - to integrate aspects of technology implementation.

**Research results.** Studies have shown that the introduction of the latest sensor technologies will improve the accuracy of pollutant measurements. The integration of Internet of Things (IoT) technologies will improve communication with data centers, ensuring fast information transfer. Optimization of the location of posts using geospatial analysis by GIS tools will allow for more efficient coverage of pollution zones. The introduction of energy-efficient technologies will reduce the power consumption of devices at observation posts, and data processing algorithms will improve the forecasting and efficiency of monitoring.

**Scientific novelty.** The number of population by administrative districts of the Dnipro agglomeration, which is located in the coverage area of the network of posts of the Regional Center for Hydrometeorology (RCHM), where air quality data are considered reliable according to the criterion of spatial distribution, is determined. The proposed approach, based on geospatial analysis using GIS tools, allows determining the minimum and sufficient number of additional observation posts. The scheme for evaluating the effectiveness of air quality monitoring systems using sensors and IoT is substantiated, which will increase the accuracy of measurements and the speed of informing the population.

**Practical significance.** Improving the accuracy and efficiency of air quality monitoring will contribute to better pollution control and improve public health. The introduction of technologies and optimization of the monitoring system will allow for a faster response to environmental threats.

**Keywords:** *agglomeration, monitoring, sensor, geographic information systems, analyzer, Internet of Things, machine learning, artificial intelligence.*