

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЛОМАЗОВ ПАВЛО КОСТЯНТИНОВИЧ

УДК 504.064:504.3.054

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО
ПОВІТРЯ МУНІЦИПАЛЬНИХ ПРОМИСЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ ТА
АГЛОМЕРАЦІЙ

183 – «Технології захисту навколишнього середовища»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ П.К. Ломазов

Наукові керівники:
доктор технічних наук, професор
Павличенко Артем Володимирович

кандидат біологічних наук, доцент
Бучавий Юрій Володимирович

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Ломазов П.К. Удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 – «Технології захисту навколишнього середовища», – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розробці технологічних рішень для розгортання та удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря на різних за масштабом рівнях: локального, регіонального і міжнародного. Об'єктом дослідження є процес удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря. Предметом дослідження є процес оперативного інформаційного, аналітичного та технічного забезпечення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій.

Виконано критичний аналіз чинних систем моніторингу атмосферного повітря в Україні та світі, проаналізовано їхні переваги, недоліки та відповідність сучасним викликам. Встановлено, що існуюча система має комплексні організаційні, технічні недоліки та законодавчі обмеження. Зокрема, недоліком є відсутність автоматизації: заміри здійснюються кілька разів на добу, дані не передаються онлайн, а результати не доступні громадськості в режимі реального часу. Обладнання є застарілим, не працює при аваріях електропостачання та не фіксує низку пріоритетних показників. Мережа постів є надто розрідженою: в агломерації Дніпро діє лише 6 постів при населенні понад мільйон осіб, що не забезпечує достовірного просторового охоплення.

При цьому, методик та технологій є велика різноманітність. Єдиної методики для всіх урбанізованих територій та місцевостей немає, кожна з них

має свої індивідуальні особливості місцевості, щільності населення, погодних умов, кількості промислових об'єктів та їх щільність тощо. Тому, наразі доцільним є врахування цих індивідуальних особливостей та підбір системи моніторингу повітря, та її адаптування, що варто вже виконувати на місцевому рівні. Недосконала є система швидкого реагування на виявлення недоліків. Світові науковці пропонують використання відкритих баз даних та інші зазначені у розділі методи, проте в Україні наразі система моніторингу виконує завдання більш інформування населення, ніж прийняття швидких управлінських рішень для коригування і виправлення критичної ситуації.

Організаційно моніторинг є нерегулярним: вимірювання проводяться лише у робочі дні, відсутні мобільні або резервні станції, не враховується вплив аварійних, тимчасових або воєнних джерел викидів. Дані з громадських або приватних сенсорів не визнаються на офіційному рівні, що обмежує можливості комплексного аналізу. Законодавчо не передбачено вимоги щодо обов'язкової передачі даних у відкритому онлайн-режимі, а нормативи залишаються не відповідними до сьогодення. Водночас проаналізовано як традиційні, так і інноваційні технології в сфері моніторингу атмосферного повітря, включно з мобільними сенсорами, дронами з газоаналізаторами та цифровими платформами. Визначені системні невідповідності стали основою для постановки завдань і побудови методології дослідження, спрямованої на модернізацію та інтеграцію систем моніторингу на локальному, регіональному та міжнародному рівнях.

Проведено аналіз даних із шести постів моніторингу агломерації Дніпро, що охоплюють основні забруднювачі повітря (пил, аміак, діоксид азоту, формальдегід, фенол, сірководень). У більшості випадків виявлено перевищення середньодобових ГДК, зокрема для пилу та аміаку – в 2–3 рази. Узагальнено технічні характеристики станцій, рік калібрування, місцезнаходження, а також виявлено відсутність автоматизованої передачі даних. Результати оцінки індексів якості в Україні та країнах ЄС і США, відрізняється за процедурою, що ускладнює інтеграцію до світових стандартів.

Фоновий моніторинг атмосферного повітря здійснено на трьох віддалених точках за межами агломерації Дніпро (10, 15 та 20 км у напрямку Сурсько-Литовського), де зафіксовано мінімальні концентрації формальдегіду (0,0 ppm), оксиду вуглецю (до 0,06 ppm), діоксиду вуглецю (0,05 ppm) та пилю РМ (до 0,07 ppm). У межах міської агломерації концентрації цих речовин були суттєво вищими: формальдегід – до 0,045 мг/м³, СО - до 2,65 мг/м³, РМ10 - до 75 мкг/м³. Додатково проведено експеримент поблизу працюючого бензинового генератора, що показав різке зростання вмісту СО (до 4,86 мг/м³), РМ2.5 (до 64 мкг/м³), РМ10 (до 110 мкг/м³) та TVOC (до 1,14 мг/м³), що підтверджує високий локальний вплив на якість повітря. Зазначені експериментальні дослідження виконані з метою обґрунтування підходів до розгортання геопросторової системи моніторингу та визначення її ключових параметрів.

Сформовано результати експериментальних досліджень фонових показників якості повітря, де доведено, що в агломераціях рівень забруднення повітря вище в 3–4 рази ніж за 15–20 км від агломерації Дніпро.

Обґрунтовано доцільність адаптації системи моніторингу атмосферного повітря до умов воєнного часу шляхом врахування нових джерел забруднення та розширення переліку пріоритетних речовин для контролю. Запропоновано класифікацію джерел викидів, що виникають під час бойових дій (ракети, БПЛА, пожежі на об'єктах), із розподілом за типом, організованістю та етапами виникнення (запуск, влучання, горіння, утилізація). Доведено, що чинна система не охоплює ці джерела та потребує впровадження мобільного та геопросторового моніторингу. До переліку пріоритетних речовин включено метали (Pb, Hg, Cr, Be), компоненти палива (нітрогліцерин, перхлорат амонію), вибухові речовини (TNT, RDX, HMX) і піротехнічні суміші (гексахлоретан, фосфори), які мають високу токсичність та канцерогенний, нейротоксичний або мутагенний ефект. Для кожної з них визначено референтні концентрації за хронічного інгаляційного впливу (RfC), критичні органи – мішені та джерела токсикологічної оцінки. Наведено порівняльну

характеристику вибухових речовин за формулою, детонаційним класом, ТНТ–еквівалентом і рівнем токсичності. Отримані результати засвідчують потребу оновлення підходів моніторингу повітря з урахуванням ризиків, пов’язаних із бойовими діями.

Обґрунтовано доцільність інтеграції аерокоптеру, оснащеного газоаналізатором безпрерервної дії в систему моніторингу як її компоненту на випадок розгортання системи оперативного (кризового) моніторингу в місцях відсутності посту спостереження та неможливості або недоцільності його встановлення там. Розроблено та запропоновано технологічний алгоритм роботи з аерокоптером і проведення місії з урахуванням факторів довкілля, зокрема стратифікації атмосфери, характеристиками джерела та прилеглої території.

Для складання оптимального маршруту аерокоптеру проведено та надано результати моделювання процесів розсіювання забруднюючих речовин від організованих джерел з використанням програми Screen View (Lakes Environment).

Окрему увагу приділено питанню конвертації та інтерпретації даних, отриманих із аерокоптера. Проведено обґрунтування способів обробки показників газоаналізатора, зокрема алгоритмів переведення первинних значень у стандартизовані одиниці концентрацій, їх подальшої просторової інтерполяції для ГІС-моделювання, а також інтеграції результатів у загальну систему оцінювання якості повітря (CAQI, КІЗА тощо). Забезпечено узгодженість даних із вимогами національного та міжнародного екологічного законодавства, що дає можливість використовувати мобільний моніторинг як доповнення до стаціонарного у форматі оперативного реагування.

Здійснено практичну реалізацію програми моніторингу повітря через описані методологічні засади, запропоновано використання ГІС «ДніпроМАП» в середовищі ArcGIS, де враховуються різні шари: топографічний, промислових об’єктів агломерації Дніпро, джерела забруднення, межі районів міста та їх екологічні параметри, ізолінії та

градієнтні профілі, перехрестя з високою інтенсивністю руху та індексами забруднення атмосфери, контури СЗЗ, області максимальних концентрацій забруднюючих речовин, розташування шкіл як джерел електроживлення та місця спостереження за якістю повітря: поточні та заплановані.

Розроблено технологію розгортання ефективної системи моніторингу атмосферного повітря на різних рівнях: локальний, регіональний та міжнародний. Локальний рівень пропонує розгортання системи моніторингу на будь-якій агломерації або промисловому комплексі, де враховуються різні параметри, такі як: стан діючої системи моніторингу, щільність населення, кількість та види промислових об'єктів, інтенсивність руху автотранспорту, види забруднюючих речовин, технічне оснащення постів тощо. Це надає змогу розгорнути систему моніторингу в конкретній агломерації. Надалі, для її розвитку та включення у регіони, рекомендується використання розробленої технології розгортання – другого регіонального рівня, що надає можливість включення та інтеграції, взаємозв'язку локальних систем моніторингу, включення їх в єдину базу. Третій – міжнародний рівень дозволяє інтегрувати систему моніторингу вже як транскордонну, з інтеграцією у всесвітні мережі, наприклад, AQMesh, Global Trials та інші. Це дозволяє постійно розвивати систему моніторингу з урахуванням сучасних вимог та новітнім дослідженням щодо оцінки якості атмосферного повітря.

Надано рекомендації щодо практичної реалізації запропонованої технології моніторингу атмосферного повітря: обґрунтовано сучасне технічне оснащення для посту спостереження за повітрям, комунікаційну мережу, захист даних та корпусу, інтеграція всіх можливих компонентів моніторингу – постів, датчиків, супутнику, аерокоптеру з газоаналізатором, а також джерел забруднення – промислові об'єкти, автотранспорт, робота генераторів, бойові дії, транскордонний вплив.

Ключові слова: атмосферне повітря, моніторинг якості повітря, забруднення повітря, важкі метали, екологічна безпека, зміна клімату, навколишнє середовище, машинне навчання, система моніторингу, пил.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові результати дисертації опубліковані в наступних працях:

Статті у наукових фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. **Ломазов П. К.**, Павличенко А. В., Бучавий Ю.В., (2023). Удосконалення методологічних підходів до розвитку системи спостереження за забрудненням атмосферного повітря в агломераціях. Збірник наукових праць НГУ. – 2023. – № 73 - С. 240 - 252. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.240>

Особистий внесок здобувача – Оцінено динаміку обсягів надходження забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення та автотранспорту. Проведено аналіз діючої системи моніторингу атмосферного повітря агломерації м. Дніпро.

2. **Ломазов П. К.**, Павличенко А. В. Удосконалення методологічних підходів до оцінки та прогнозування змін стану довкілля внаслідок воєнних дій. Збірник наукових праць НГУ. – 2024. – № 77 - С. 174 - 183. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.174>

Особистий внесок здобувача – Проаналізовано види джерел забруднення, що виникають внаслідок воєнних дій. Проаналізовано будову ракетного обладнання та вміст речовин.

3. **Ломазов П. К.**, Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Оптимізація та удосконалення технічного оснащення стаціонарних постів спостереження за атмосферним повітрям в агломераціях. Збірник наукових праць НГУ. – 2024 - № 78. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.140>

Особистий внесок здобувача – Розроблено алгоритм технічного оснащення стаціонарних постів спостереження.

4. **Ломазов П. К.**, Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Методи прогнозування забруднення атмосферного повітря на основі машинного

навчання. Збірник наукових праць НГУ. – 2025 №79
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.278>

Особистий внесок здобувача – Проведено аналіз концентрацій забруднюючих речовин та метеорологічних параметрів. Обґрунтовано доцільність застосування методів машинного навчання для аналізу і прогнозування часових рядів концентрацій забруднюючих речовин.

5. **Ломазов П. К.,** Бучавий Ю. В. Удосконалення методики прогнозування несприятливих метеорологічних умов для розсіювання забруднювальних речовин в атмосферному повітрі. Збірник наукових праць НГУ. – 2025 №80, 301-314. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.301>

Особистий внесок здобувача – Запропоновано методичні підходи до прогнозування метеорологічних умов та моделювання розсіювання забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери з урахуванням рельєфу, джерел викидів і просторово-часової мінливості погодних факторів.

Матеріали наукових конференцій:

6. **Ломазов П. К.,** Бучавий Ю. В. Розвиток системи моніторингу атмосферного повітря агломерації Дніпро у зв'язку з процесами Євроінтеграції. Матеріали XII Всеукраїнської науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2022. https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/161080/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%9D%D0%92_2022-111-113.pdf?sequence=1

Особистий внесок здобувача – Запропоновано розміщення додаткових постів спостереження за атмосферним повітрям.

7. **Ломазов П. К.** Взаємозв'язок системи екологічного моніторингу атмосферного повітря та сталого розвитку місцевих громад. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 2022. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/32.pdf>

Особистий внесок здобувача – Проаналізовано Законодавства України та ЄС та переліку викликів, що виникають щодо процесів Євроінтеграції.

8. **Ломазов П. К.,** Павличенко А. В. Впровадження міжнародного досвіду в системи екологічного моніторингу атмосферного повітря в Україні. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2023. https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/164011/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%B2%D0%B5%D1%81%D0%BD%D0%B0_2023-114-116.pdf?sequence=1.

Особистий внесок – здійснено аналіз сучасних підходів до визначення зон контролю якості повітря, зокрема європейських практик (на прикладі м. Барселона), узагальнено роль щорічного моніторингу у формуванні державної стратегії зниження викидів.

9. **Ломазов П. К.,** Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Теоретичні основи побудови інформаційно-аналітичних систем в екологічному моніторингу атмосферного повітря. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «МОЛОДЬ: НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ», 22-24 листопада 2023 р. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/165755>

Особистий внесок – опрацьовано теоретичні засади побудови інформаційно-аналітичних систем для цілей екологічного моніторингу атмосферного повітря, зокрема проаналізовано структуру, функції та вимоги до таких систем в умовах урбанізованого середовища.

10. **Ломазов П. К.,** Павличенко А. В. Система екологічного моніторингу на гірничих підприємствах. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «МОЛОДЬ: НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ», 22-24 листопада 2023 р. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/166860>.

Особистий внесок – досліджено особливості організації системи моніторингу на гірничих підприємствах та визначено ключові чинники її ефективності.

11. Buchavyi Yu. Development of the environmental monitoring system as a basis for ensuring sustainable development of local communities / Yurii Buchavyi, **Pavlo Lomazov** // Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities: collection of scientific articles. – Dresden, 2024. – Pp. 84-86.
<https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/167801/0%20%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BA%D0%B0%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B9-%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%BB. fin-84-86.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Особистий внесок – обґрунтовано ролі системи моніторингу як інструменту сталого розвитку громад та проаналізовано можливості її інтеграції у місцеві управлінські практики.

12. **Ломазов П. К.**, Павличенко А. В. Вплив військових дій на атмосферне повітря на урбанізованих територіях. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2024.
https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/167040/Scientific_Spring_2024-91-92.pdf?sequence=1.

Особистий внесок – проаналізовано вплив військових дій на стан атмосферного повітря в містах, узагальнено основні типи забруднень та джерел, притаманних воєнному часу.

13. **Ломазов П. К.**, Павличенко А. В. «Інтелектуальні методи прогнозування рівня забруднення атмосфери на базі алгоритмів машинного навчання. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. збалансоване природокористування, Львів, Україна, 27 березня 2025.
https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2025/feb/38049/programakon_resu2025.pdf

Особистий внесок – досліджено застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування рівня забруднення повітря та визначено найбільш ефективні моделі для моніторингу.

14. **Ломазов П.К.**, Павличенко А.В., Бучавий Ю.В., «Сучасні підходи до прогнозування якості повітря за допомогою машинного навчання» Ломазов П.К., Павличенко А.В. Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2025.

Особистий внесок – опрацьовано сучасні підходи до прогнозування якості повітря із використанням методів машинного навчання, проведено тестування моделей на реальних екологічних даних.

15. **Ломазов П.К.**, Павличенко А.В. «Комплексна оцінка екологічного стану навколишнього середовища в гірничопромислових регіонах» // Матеріали XV Міжнародної науково–технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», секція № 24 «Перспективи освоєння критичної мінеральної сировини в Україні та Європейському Союзі», м. Дніпро, 26–28 березня 2025 р. – Дніпро: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2025.

Особистий внесок – проведено аналіз екологічного стану гірничопромислових регіонів та запропоновано підходи до комплексної оцінки з урахуванням впливу промислових факторів.

ABSTRACT

Lomazov P.K. Enhancement of the Air Quality Monitoring System for Municipal Industrial Complexes and Agglomerations. – Qualification scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of 183 - Environmental Protection Technologies (18 - Production and Technology) – Dnipro University of Technology of the Ministry of Science and Education of Ukraine, Dnipro, 2025.

The dissertation is devoted to the development of technological solutions for the deployment and improvement of atmospheric air monitoring systems at various levels: local, regional and international. The object of the study is the process of improving the atmospheric air monitoring system. The subject of the study is the process of operational information, analytical and technical support of the atmospheric air monitoring system of municipal industrial complexes and agglomerations.

A critical analysis of existing atmospheric air monitoring systems in Ukraine and worldwide has been carried out, and their advantages, disadvantages and compliance with modern challenges have been analysed. It has been established that the existing system has complex organisational and technical shortcomings and legislative restrictions. One shortcoming is the lack of automation: measurements are taken several times a day, data is not transmitted online, and the results are not available to the public in real time. The equipment is outdated, does not work during power outages, and does not record several priority indicators. The network of stations is too sparse: there are only six stations in the Dnipro agglomeration with a population of over one million, which does not provide reliable spatial coverage.

At the same time, there is a wide variety of methods and technologies. There is no single methodology for all urbanised areas and localities, each of which has its own individual characteristics in terms of terrain, population density, weather conditions, number of industrial facilities and their density, etc. Therefore, it is

currently advisable to take these individual characteristics into account and select and adapt an air monitoring system, which should already be implemented at the local level. The rapid response system for identifying deficiencies is imperfect. Scientists around the world propose the use of open databases and other methods mentioned in the section, but in Ukraine, the monitoring system currently serves more to inform the public than to make quick management decisions to correct and remedy critical situations.

Organisationally, monitoring is irregular: measurements are taken only on working days, there are no mobile or backup stations, and the impact of emergency, temporary or military sources of emissions is not taken into account. Data from public or private sensors is not officially recognised, which limits the possibilities for comprehensive analysis. There are no legal requirements for mandatory data transfer in open online mode, and the standards remain outdated. At the same time, both traditional and innovative technologies in the field of atmospheric air monitoring were analysed, including mobile sensors, drones with gas analysers and digital platforms. The identified systemic inconsistencies formed the basis for setting tasks and developing a research methodology aimed at modernising and integrating monitoring systems at the local, regional and international levels.

Data from six monitoring stations in the Dnipro agglomeration covering the main air pollutants (dust, ammonia, nitrogen dioxide, formaldehyde, phenol, hydrogen sulphide) were analysed. In most cases, the average daily MPCs were exceeded, for dust and ammonia – by 2–3 times. The technical characteristics of the stations, the year of calibration, and the location were summarised, and the absence of automated data transmission was identified. The results of the assessment of quality indices in Ukraine and the EU and US countries differ in terms of procedure, which complicates integration with global standards.

Background monitoring of atmospheric air was carried out at three remote points outside the Dnipro agglomeration (10, 15 and 20 km in the direction of Sursko-Lithuanian), where minimum concentrations of formaldehyde (0 ppm), carbon monoxide (up to 0.06 ppm), carbon dioxide (0.05 ppm) and PM dust (up to

0.07 ppm) were recorded. Within the urban agglomeration, the concentrations of these substances were significantly higher: formaldehyde – up to 0.045 mg/m³, CO – up to 2.65 mg/m³, PM10 – up to 75 µg/m³. An additional experiment was conducted near a running petrol generator, which showed a sharp increase in the content of CO (up to 4.86 mg/m³), PM2.5 (up to 64 µg/m³), PM10 (up to 110 µg/m³) and TVOC (up to 1.14 mg/m³), confirming the high local impact on air quality. These experimental studies were conducted to justify approaches to the deployment of a geospatial monitoring system and to determine its key parameters.

The results of experimental studies of background air quality indicators have been compiled, proving that air pollution levels in agglomerations are 3–4 times higher than 15–20 km away from the Dnipro agglomeration.

The feasibility of adapting the atmospheric air monitoring system to wartime conditions by taking into account new sources of pollution and expanding the list of priority substances for control is justified. A classification of emission sources arising during combat operations (rockets, UAVs, fires at facilities) is proposed, with a breakdown by type, organisation and stages of occurrence (launch, impact, combustion, disposal). It has been proven that the current system does not cover these sources and requires the implementation of mobile and geospatial monitoring. The list of priority substances includes metals (Pb, Hg, Cr, Be), fuel components (nitroglycerin, ammonium perchlorate), explosives (TNT, RDX, HMX) and pyrotechnic mixtures (hexachloroethane, phosphors), which are highly toxic and have carcinogenic, neurotoxic or mutagenic effects. For each of them, reference concentrations for chronic inhalation exposure (RfC), critical target organs and sources of toxicological assessment have been determined. A comparative characterisation of explosives by formula, detonation class, TNT equivalent and toxicity level is provided. The results obtained confirm the need to update air monitoring approaches, taking into account the risks associated with combat operations.

The feasibility of integrating an aerocopter equipped with a continuous gas analyser into the monitoring system as its component in case of deployment of an

operational (crisis) monitoring system in places where there is no observation post and it is impossible or impractical to install one there is justified. A technological algorithm for working with the aerocopter and conducting missions has been developed and proposed, taking into account environmental factors, in particular atmospheric stratification, source characteristics and the surrounding area.

To determine the optimal route for the aerocopter, the results of modelling the processes of pollutant dispersion from organised sources using the Screen View (Lakes Environment) programme were obtained and presented.

Particular attention was paid to the conversion and interpretation of data obtained from the aerocopter. The methods of processing gas analyser indicators were substantiated, the algorithms for converting primary values into standardised concentration units, their subsequent spatial interpolation for GIS modelling, and the integration of the results into the general air quality assessment system (CAQI, KIZA, etc.). The data is consistent with the requirements of national and international environmental legislation, which makes it possible to use mobile monitoring as a supplement to stationary monitoring in the form of rapid response.

The air monitoring programme has been implemented in practice using the described methodological principles, and the use of the DniproMAP GIS in the ArcGIS environment has been proposed, where various layers are taken into account: topographical, industrial facilities in the Dnipro agglomeration, sources of pollution, city district boundaries and their environmental parameters, isolines and gradient profiles, intersections with high traffic intensity and air pollution indices, sanitary protection zone contours, areas of maximum pollutant concentrations, the location of schools as power sources, and air quality observation sites: current and planned.

Technology has been developed for deploying an effective atmospheric air monitoring system at various levels: local, regional and international. The local level offers the deployment of a monitoring system in any agglomeration or industrial complex, taking into account various parameters such as the state of the existing monitoring system, population density, number and types of industrial facilities,

traffic intensity, types of pollutants, technical equipment of stations, etc. This makes it possible to deploy a monitoring system in specific agglomeration. Subsequently, for its development and inclusion in regions, it is recommended to use the developed deployment technology – the second regional level, which provides the possibility of inclusion and integration, interconnection of local monitoring systems, and their inclusion in a single database. The third – international level allows the monitoring system to be integrated as a cross-border system, with integration into global networks such as AQMesh, Global Trials and others. This allows for the continuous development of the monitoring system, taking into account current requirements and the latest research on air quality assessment.

Recommendations are provided for the practical implementation of the proposed air monitoring technology: modern technical equipment for air observation posts, communication networks, data and housing protection, integration of all possible monitoring components – posts, sensors, satellites, aerocopters with gas analysers, as well as sources of pollution – industrial facilities, motor vehicles, generators, military operations, cross-border impact.

Keywords: atmospheric air, air quality monitoring, air pollution, heavy metals, environmental safety, climate change, environment, machine learning, monitoring system, dust.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ТЕРИТОРІЇ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ.....	30
1.1. Аналіз стану державної системи моніторингу атмосферного повітря в Україні	30
1.2. Аналіз сучасних досліджень і публікацій у сфері моніторингу атмосферного повітря у містах.....	36
1.3 Сучасні підходи до розробки та реалізації систем моніторингу атмосферного повітря	42
1.4 Застосування інформаційно-аналітичних систем в моніторингу атмосферного повітря	46
Висновки до розділу 1.....	49
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ МУНІЦИПАЛЬНИХ ПРОМИСЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ ТА АГЛОМЕРАЦІЙ.....	51
2.1. Виявлення недоліків існуючої схеми розміщення стаціонарних постів спостереження на території агломерації.....	51
2.2. Розроблення вимог до розміщення та кількості постів спостережень в агломераціях	71
2.3. Теоретичні основи побудови інформаційно-аналітичних систем в моніторингу атмосферного повітря на територіях промислових комплексів і агломерацій.....	73
2.4. Аналіз стану забруднення атмосферного повітря в умовах муніципальних промислових комплексів та агломерацій.....	77
2.5. Експертне оцінювання поточної та оперативної інформації про стан забруднення атмосферного повітря в умовах муніципальних промислових комплексів та агломерацій.....	80
2.6. Удосконалення методологічних підходів до оцінки та прогнозування змін стану довкілля, шкоди та збитків внаслідок воєнних дій	82
Висновки до розділу 2.....	86
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СКЛАДОВИХ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ПРИКЛАДІ АГЛОМЕРАЦІЇ ДНІПРО.....	88

3.1. Обґрунтування вибору місць розташування постів спостережень та розгортання оновленої мережі моніторингу атмосферного повітря	88
3.2. Обґрунтування інтеграції неорганізованих джерел забруднення в комплексну систему моніторингу повітря.....	92
3.4. Визначення фонових концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за межами міської агломерації.....	95
3.5 Реалізація, апробація та інтеграція розробленої програми моніторингу в національні та міжнародні екологічні системи	97
3.6. Практична реалізація підсистеми оперативного інформування населення про небезпечні рівні забруднення атмосферного повітря.....	99
3.8. Оцінка ефективності розробленої програми моніторингу та реалізація коригувальних заходів	102
Висновки за розділом.....	106
РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЯ З УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ АГЛОМЕРАЦІЙ.....	108
4.1. Технологія з розгортання удосконаленої системи моніторингу атмосферного повітря на різних рівнях	108
4.2. Інвентаризація джерел викидів як перший етап практичної реалізації технології розгортання системи моніторингу атмосферного повітря в агломерації.....	115
4.3 Обґрунтування місць розташування станцій моніторингу на територіях промислових агломерацій з урахуванням забруднення та щільності населення, як вагомий елемент реалізації технології.....	119
4.4. Обґрунтування переліку устаткування для постів спостереження.....	131
4.5. Реалізація моніторингу якості атмосферного повітря на основі використання аерокopterів з додатковим обладнанням – газоаналізаторами	144
4.6. Моделювання процесів розсіювання забруднюючих речовин від організованих джерел для складання оптимального маршруту аерокopterу	150
4.7 Реалізація технології інформування населення в системі моніторингу атмосферного повітря	153
4.8. Реалізація інтелектуальної локальної багаторівневої системи моніторингу атмосферного повітря та оповіщення для промислових агломерацій в умовах кризових ситуацій	159

4.9. Оцінка практичної цінності удосконаленої системи моніторингу атмосферного повітря	166
Висновки до розділу 4.....	172
ЗАКЛЮЧНІ ВИСНОВКИ.....	175
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	178
Додаток А	200
Додаток Б.....	205
Додаток В.....	206
Додаток Г	208
Додаток І	209
Додаток Д	210
Додаток Е.....	211

ВСТУП

Актуальність теми. Система моніторингу атмосферного повітря на урбанізованих територіях, у містах та на муніципальних об'єктах і промислових комплексах є однією з ключових складових забезпечення екологічної безпеки населення та збереження довкілля, в тому числі в розрізі екологічного права та євроінтеграції. У сучасних умовах стрімкої урбанізації, зростання промислового навантаження та збільшення транспортного руху, а також в умовах війни в питаннях вибухів та надзвичайних ситуацій питання якості атмосферного повітря стає критично важливим. Враховуючи, що забруднення повітря негативно впливає не лише на здоров'я людей, але й на стан екосистем, економіку регіонів та на зміну клімату, необхідність удосконалення системи моніторингу стає очевидною.

Сучасні технології, що використовуються для моніторингу якості атмосферного повітря, виявляються недостатньо ефективними через стрімкі зміни у Законодавстві, промислових процесах, появі нових джерел забруднення, воєнних дій в Україні та підвищення вимог до точності й оперативності отримання даних. Багато існуючих методик сьогодні не відповідають сучасним викликам, зокрема через недостатню чутливість до нових забруднювачів, євроінтеграційні процеси або через обмежені можливості інтеграції з цифровими системами управління.

У контексті євроінтеграційних процесів, які тривають в Україні, особливе значення надається імплементації та впровадженню європейських стандартів і підходів до моніторингу атмосферного повітря. Від цього з'являється потреба не лише оновлення нормативно-правової бази, але й впровадження інноваційних технологій та розробки нових методів збору, обробки та аналізу екологічних даних. Удосконалення системи моніторингу повітря має також враховувати необхідність адаптації до сучасних тенденцій, таких як використання автоматизованих систем, датчиків реального часу, в тому числі використання сенсорних датчиків, супутникових даних і технологій штучного інтелекту та Інтернету речей.

Окремо варто відзначити, що ефективна та удосконалена система моніторингу атмосферного повітря сприяє не лише ідентифікації джерел забруднення, але й створює можливості для планування ефективних заходів та адміністративних рішень щодо зменшення негативного впливу.

Більше того, готову існуючу систему моніторингу, яка б була відома у світі, не можливо відразу імплементувати під конкретну агломерацію, оскільки кожна система враховує певні особливості регіонів. Тому, зростає необхідність у створенні технології, за якою можна створювати систему моніторингу атмосферного повітря в агломераціях, містах та промислових комплексах з урахуванням різних критеріїв, таких як кількість та місцерозташування промислових об'єктів, концентрації та видів забруднюючих речовин, щільності населення, інтенсивності руху автомобільного транспорту на автомагістралях, географічні особливості регіону, врахування метеорологічних даних тощо. Відповіді на ці питання і надають технічне рішення щодо необхідності встановлення постів спостереження за атмосферним повітрям в тих місцях, де це дійсно необхідно для покращення системи моніторингу повітря та інформування населення.

Таким чином, актуальність теми «Удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій» зумовлена різними факторами: як сучасними викликами у сфері екологічної безпеки, так і необхідністю інтеграції України у європейську екологічну спільноту, а також недосконалість діючої системи моніторингу атмосферного повітря.

Вирішення цих питань дозволить не лише підвищити якість життя населення, але й сприятиме сталому розвитку регіонів і агломерацій та збереженню природних ресурсів для майбутніх поколінь.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі екології та технологій захисту навколишнього середовища НТУ «Дніпровська політехніка», вона є

складовою частиною НДР: Розробка «Програми державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря м. Дніпра». ДК 021-2015: 90730000-3 – Відстеження, моніторинг забруднень і відновлення»; ГП–515 «Обґрунтування технологічних рішень екологічнобезпечного освоєння мінеральних ресурсів в умовах відбудови країни у воєнний і післявоєнний періоди» (№ держреєстрації 0123U101759).

Ідея роботи полягає в розробці технології щодо удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря, тим самим підвищення екологічної безпеки для населення.

Мета і завдання дослідження. Розробка технологій, методів та засобів оперативного інформаційного, аналітичного та технічного забезпечення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій з урахуванням особливостей їх розташування, рівнів забруднення й умов розсіювання екологічно небезпечних домішок в атмосфері з наступною інтеграцією в регіональну, національну та міжнародну системи моніторингу.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1) виконати теоретичний аналіз міжнародних і національних систем моніторингу атмосферного повітря в агломераціях, включаючи технології управління якістю повітря, методологічні засади їх удосконалення та нормативні вимоги до розміщення постів спостереження.

2) проаналізувати існуючі пости спостереження за повітрям в агломерації Дніпро, а також їхнє технічне оснащення, характеристики датчиків та параметри кожного посту;

3) дослідити та розробити методологічні підходи до оцінки та прогнозування змін стану довкілля внаслідок воєнних дій;

4) обґрунтувати вибір місць розташування постів спостережень оновленої мережі моніторингу атмосферного повітря та перелік сучасного устаткування для постів спостереження;

5) змодельовати процеси розсіювання забруднюючих речовин від організованих джерел для складання оптимального маршруту аерокоптерів з газоаналізатором для контролю якості атмосферного повітря;

6) розробити та практично реалізувати технологію розгортання ефективної системи моніторингу атмосферного повітря на локальному, регіональному та міжнародному рівнях.

Методи досліджень. У роботі використано комплекс теоретичних, методологічних та практичних методів дослідження. Теоретичний аналіз охоплював існуючі, традиційні та сучасні системи моніторингу атмосферного повітря в агломераціях та промислових комплексах, а також дослідження та технології їх побудови. Проаналізовані не тільки комплекси системи, а і окремі її частини, наприклад, технічне устаткування постів спостереження. Метод охопив аналіз та обґрунтування існуючих методологічних підходів до запровадження, створення та постійного удосконалення систем моніторингу, технічного устаткування станцій та пересувних постів спостереження, а також підходи до оцінки та прогнозування змін стану довкілля внаслідок воєнних дій.

Об'єктом дослідження є процес удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря.

Предметом дослідження є процес оперативного інформаційного, аналітичного та технічного забезпечення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

- обґрунтовано місця розташування додаткових пунктів спостереження за якістю атмосферного повітря на прикладі промислових комплексів та агломерацій з урахуванням просторового розміщення підприємств, зональних концентрацій викидів забруднюючих речовин, щільності населення за адміністративними районами агломерації, зони покриття мережі постів

регіонального центру гідрометеорології; що забезпечує підвищення достовірності просторового розподілу показників якості повітря;

- виявлено та встановлено закономірність між швидкістю вітру, хмарністю, висотою Сонця над горизонтом та коефіцієнтом вертикальної турбулентної дифузії, що дозволило удосконалити алгоритм розрахунку масопереносу забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери та підвищити точність моделювання процесів розсіювання.

Дістало подальшого розвитку:

- методика визначення мінімально достатньої кількості додаткових постів спостереження на основі геопросторового аналізу агломерацій у середовищі геоінформаційної системи (ГІС), що сприяє оптимізації структури моніторингу, оперативності реагування та економії ресурсів;

- модель та функціональна схема оцінювання ефективності систем моніторингу якості атмосферного повітря з урахуванням даних від стаціонарних і мобільних сенсорів (датчиків), а також технологій Інтернету речей (IoT), що дозволило підвищити точність визначення вмісту забруднюючих речовин та швидкість інформування населення.

Запропоновано:

- удосконалену методику виявлення особливостей та масштабів впливу воєнних дій (вибухів, пожеж, горіння техніки, руйнування об'єктів, дії боєприпасів, продуктів детонації, компонентів ракетного палива) на стан атмосферного повітря, екологічну ситуацію та здоров'я населення в агломераціях.

Практична значимість роботи.

- розроблена та обґрунтована технологія удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря в агломераціях та промислових комплексах;

- підвищено точність та оперативність моніторингу якості повітря, що сприятиме об'єктивному контролю за забрудненням та дозволить

оперативно реагувати на екологічні загрози та приймати ефективні заходи для зниження забруднення повітря;

- можливість використання розроблених моделей для міського управління та моніторингу. Зокрема, моделі можуть бути інтегровані у системи раннього попередження громадян про ризики забруднення, оптимізацію транспортних потоків, а також у мобільні додатки та веб-платформи для надання інформації про стан повітря в режимі реального часу;

- врахування несприятливих метеорологічних умов на період до 3–7 днів дозволить прогнозувати зміни якості атмосферного повітря. Запропонований підхід може бути використаний у системах моніторингу довкілля, при розробці стратегій зменшення забруднення, а також у наукових дослідженнях з моделювання атмосферних процесів. Врахування метеорологічних факторів у прогнозуванні забруднення повітря сприятиме більш ефективному плануванню заходів щодо зниження рівня шкідливих викидів та охорони здоров'я;

- усвідомлення та мінімізація екологічних ризиків, які пов'язані із використанням боєприпасів через надання детальної інформації про токсичні компоненти та їхній вплив на здоров'я та довкілля. Це також окреслює необхідність дотримання нормативних норм утилізації боєприпасів, а також покращує практику військових навчань з точки зору екологічної безпеки, що загалом веде до вдосконалення нормативних актів і підвищення рівня екологічної безпеки в умовах воєнних дій з використанням сучасних засобів та ракетних комплексів.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблена та обґрунтована технологія розгортання системи моніторингу атмосферного повітря. Запропонований підхід надасть можливість отримувати інформацію про якість атмосферного повітря як за вітчизняними стандартами і нормативами так і міжнародними, що сприятиме покращенню врахування євроінтеграційних процесів та розширенню мережі моніторингу. Запропоновані технології збільшення точності та оперативності

моніторингу якості повітря, в тому числі його ефективності, що сприятиме можливості покращити контроль за забрудненням і захисту здоров'я населення. Впровадження технологій та оптимізація системи моніторингу дозволить більш швидко реагувати на екологічні ризики. Усвідомлення та мінімізація екологічних загроз, які пов'язані із використанням боєприпасів через надання детальної інформації про токсичні компоненти та їхній вплив на здоров'я людини та навколишнє середовище.

Впровадження результатів роботи.

Запропоновані в дисертаційній роботі методики обґрунтування локацій для постів спостереження за якістю атмосферного повітря із застосуванням геоінформаційних технологій, а також технологія побудови траєкторій польоту аероплана поблизу джерел забруднення і алгоритм побудови системи моніторингу якості повітря в агломераціях, впроваджені у навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Вони застосовуються у практикумах дисциплін «Моніторинг довкілля», «Екологічна безпека», «Системний аналіз якості навколишнього середовища», «Моделювання екологічних систем і процесів», «Геоінформаційні технології захисту довкілля», а також використовуються під час виконання курсових і кваліфікаційних робіт бакалаврів і магістрів.

Окремі результати дослідження впроваджені у практичну діяльність Департаменту екологічної політики Дніпровської міської ради, зокрема при розробці нових підходів до організації системи моніторингу атмосферного повітря агломерації «Дніпро», враховуючи геопросторовий аналіз та алгоритми машинного навчання. Ці методики також використовуються у Програмі державного моніторингу якості атмосферного повітря на 2022-2026 роки, затвердженій рішенням міської ради.

Розроблені технологічні рішення також впроваджено у діяльність Департаменту екології та природних ресурсів Дніпропетровської обласної військової адміністрації. Вони стали основою для ефективного оновлення

системи моніторингу атмосферного повітря у межах адміністративно-територіальних одиниць області, зокрема в умовах воєнного часу.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати, що виносяться на захист у межах дисертаційної роботи, були здобуті безпосередньо здобувачем вищої освіти. Самостійно здійснено збір, перевірку та просторову обробку даних про стан чинної системи моніторингу атмосферного повітря в місті Дніпро, зокрема – актуальну інформацію про розташування постів спостереження, джерела забруднення, метеорологічні умови, щільність населення та технічні характеристики обладнання.

Здобувачем проаналізовано діючі національні та міжнародні методології моніторингу, а також розроблено авторський підхід до геопросторової оптимізації мережі постів з урахуванням зональних концентрацій, впливу промислових джерел і щільності населення. Саме на підставі цього запропоновано місця розміщення нових постів, а також визначено їхню мінімально необхідну кількість із використанням ГІС-засобів та логіки адаптивної оптимізації.

Частину польових досліджень, включно з вимірюванням викидів від генератора в міських умовах, аналізом рівня шуму та фіксацією присутності окремих речовин у повітрі, здобувач виконав особисто. Здійснено розрахунок показників розсіювання забруднюючих речовин, оцінку концентрацій та перевищень гранично допустимих норм, а також обґрунтовано включення нового типу джерела забруднення (генераторів) до системи спостереження.

У межах роботи здобувачем також розроблено функціональну структуру мобільного моніторингу на основі аерокоптера з газоаналізатором, підготовлено маршрут місії, методику обробки первинних даних, алгоритми їх конверсії та інтерполяції в рамках просторової моделі. Здійснено інтеграцію результатів у систему оцінювання якості повітря (зокрема, $SAQI$, $KI3A$), адаптовано їх під стандарти ЄС, і проведено тестову реалізацію цього підходу.

Усі ці елементи були зведені у єдину технологічну модель, яку здобувач інтегрував у середовище ArcGIS у вигляді цифрової ГІС «ДніпроМАП», із побудовою повноцінної багаторівневої системи моніторингу – локального, регіонального та міжнародного рівнів.

Формулювання завдань дослідження, обговорення результатів, наукове структурування та формулювання висновків здійснювались здобувачем у тісній співпраці з науковими керівниками.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародних та Всеукраїнських науково-практичних конференціях: XII Всеукраїнській науково-технічній конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2022; Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 2022; XIII Міжнародній науково-технічній конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2023; XI Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації»; sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities; XIV Міжнародній науково-технічній конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2024; Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. збалансоване природокористування, Львів, Україна, 27 березня 2025; XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2025.

Публікації.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, серед яких: 5 публікацій у виданнях, що включені до переліку наукових фахових видань України; 15 тез доповідей на Всеукраїнських та Міжнародних науково-практичних конференціях;

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 211 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 147 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 32 таблицями та 50 рисунками. Список використаних джерел містить 156 найменувань, з них 98 кирилицею та 58 латиницею

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ТЕРИТОРІЇ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

Система моніторингу атмосферного повітря на урбанізованих територіях, містах та муніципальних об'єктів потребує аналізу та постійного вдосконалення, так як з часом старі методи та системи втрачають унікальність та актуальність. Згідно з процесами євроінтеграції, питання вдосконалення та аналізу системи моніторингу є на часі.

1.1. Аналіз стану державної системи моніторингу атмосферного повітря в Україні

Наразі в Україні діє система моніторингу, зокрема моніторингу атмосферного повітря. Створення та існування державної системи моніторингу регламентується Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» [1]. В Законі передбачалось створення державної системи моніторингу довкілля (ДСМД). Функціями ДСМД є проведення спостережень за станом навколишнього природного середовища, рівнем його забруднення. Організація моніторингу навколишнього природного середовища, створення і забезпечення роботи мережі загальнодержавної екологічної автоматизованої інформаційно-аналітичної системи забезпечення доступу до екологічної інформації покладається на центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері охорони навколишнього природного середовища.

Функціонування ДСМД визначається постановою Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 № 391 «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля» [2].

Функції та завдання моніторингу, спостереження та інформування у державній системі моніторингу довкілля виконують наступні суб'єкти моніторингу: Мінприроди, МНС, МОЗ, Мінагрополітики, Мінжитлокомунгосп, Держводгосп, Держкомлісгосп, Держкомзем. Кожен з них займається тими об'єктами довкілля, які визначені Положенням про державну систему моніторингу довкілля та порядками і положеннями про державний моніторинг окремих складових довкілля.

Основними документами, що регламентують моніторинг об'єктів довкілля, є:

- постанова Кабінету Міністрів України від 09.03.1999 № 343 «Про затвердження Порядку організації та проведення моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» [3];
- постанова Кабінету Міністрів України від 20.07.1996 № 815 «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод» [4];
- постанова Кабінету Міністрів України від 20.08.1993 № 661 «Про затвердження Положення про моніторинг земель» [5];
- постанова Кабінету Міністрів України від 26.02.2004 №51 «Про затвердження Положення про моніторинг ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення» [6].

Постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2001 № 1551 було утворено Міжвідомчу комісію з питань моніторингу довкілля. Мета комісії - координація діяльності суб'єктів системи моніторингу довкілля, розгляд питань про проведення моніторингу довкілля на основі державної та місцевих програм моніторингу довкілля.

Державна гідрометеорологічна служба МНС також здійснює спостереження за радіоактивним забрудненням атмосфери. Це відбувається через щоденні заміри доз гамма-радіаційної експозиції (ГРЕ), осідання радіоактивних частинок, що знаходяться в атмосферному повітря.

Окрім моніторингу повітря, лабораторіями різних відомств проводиться контроль у місцях концентрації радіоактивних речовин ще й у ґрунтах, водоймах та харчових продуктах.

Здійснюється моніторинг концентрацій доз ГРЕ на 10 автоматизованих пунктах поблизу атомних електростанцій. Навколо Чорнобильської АЕС, здійснюється моніторинг та спостереження за концентрацією радіонуклідів, концентрації їх в атмосферних опадах. Радіоекологічна лабораторія Чорнобильського центру ядерної безпеки, радіоактивних відходів та радіоекології у Славутичі, здійснює моніторинг впливу радіації на біоту у зоні відчуження [7].

Існує три рівні реалізації державної системи моніторингу, вони розподілені за державним принципом:

- загальнодержавний рівень, що виділяє основні пріоритети по всій країні;
- територіальний рівень, що виділяє основні пріоритети територіальної громади/регіону;
- локальний рівень, що виділяє основні пріоритетні питання окремих територій зі збільшеним техногенним навантаженням або основними шкідливими чинниками, що зумовлюють необхідність існування такого рівня [1].

Наразі спостереження за станом атмосферного повітря проводиться на постах спостереження Українського гідрометеорологічного центру (УкрГМЦ) Державної служби України з надзвичайних ситуацій, що здійснює моніторинг у 30 містах України на 125 пунктах спостережень [8].

УкрГМЦ має певні недоліки в системі моніторингу атмосферного повітря, а саме [9]:

- пости спостереження за атмосферним повітрям визначаються у кількості та місць розташування залежно від чисельності населення;

- пости орієнтовані на збір інформації щодо впливу конкретних промислових або інших джерел забруднення довкілля і встановлюються близько до об'єктів впливу;
- оцінювання впливу фізичних чинників не здійснюється через значну динаміку рівнів забруднення атмосферного повітря та відсутності доцільності їх фіксації на стаціонарних постах мережі спостережень;
- співпраця різних організацій, що займаються моніторингом атмосферного повітря на міських рівнях відсутня або не координована;
- оцінювання впливу фізичних чинників формування екологічної небезпеки забруднення атмосферного повітря не здійснюється внаслідок значної динаміки рівнів забруднення та недоцільності фіксації цих параметрів на стаціонарних постах мережі спостережень [10].

Більшість визначених недоліків має організаційний або технічний характер та може бути усуненою шляхом удосконалення законодавчої бази та створення автоматизованих інформаційно-аналітичних систем. Теоретичний базис щодо створення або вдосконалення систем моніторингу на рівні урбанізованих територій практично не висвітлений в літературі, отже не є достатньо опрацьованим.

Моніторинг атмосферного повітря проводиться з метою отримання, збору, обробки та аналізу інформації та результатів щодо видів та концентрацій викидів забруднюючих речовин та рівня забруднення атмосферного повітря, оцінки та прогнозування його змін та розроблення рекомендацій для прийняття управлінських рішень [11].

Управління якістю довкілля включає в себе також і аспекти підтримки прийняття управлінських рішень. Згідно аналізу, можна сказати, що суттєвий недолік є саме у відсутності координації або недосконалій координації різних організацій та суб'єктів, що займаються моніторингом довкілля між собою та з міськими чи обласними самоуправліннями.

Як допоміжний захід з поліпшення моніторингу атмосферного повітря України, є організація системи моніторингу за допомогою пересувних муніципальних екологічних лабораторій (ПМЕЛ).

Суб'єктами ДСМД створені, або розробляються відомчі бази даних моніторингової інформації. Існуюча система інформаційної взаємодії відомчих підсистем моніторингу довкілля передбачає обмін інформацією на загальнодержавному та регіональному рівнях. Організаційна інтеграція суб'єктів моніторингу довкілля на всіх рівнях здійснюється Мінприроди та його територіальними органами.

Для організації та координації обміну отриманих результатів моніторингу за показниками та термінами надання екологічної інформації між суб'єктами ДСМД та Мінприроди було укладено двохсторонні договори про співробітництво у сфері моніторингу навколишнього природного середовища, до яких розроблені відповідні регламенти обміну екологічною інформацією. Міндовкілля, Держводагентство, Держгеонадра, ДСНС та їх територіальні органи (у разі їх утворення) здійснюють оперативне управління інформацією, одержаною на всіх рівнях функціонування системи моніторингу [12].

Оперативна моніторингова інформація передається територіальними органами суб'єктів ДСМД до регіональних центрів моніторингу довкілля, або державних управлінь охорони навколишнього природного середовища в регіонах. Узагальнена аналітична інформація надається міністерствами та відомствами-суб'єктами ДСМД Мінприроди. Отримані дані передаються до Інформаційно-аналітичного центру Мінприроди та накопичується у банках екологічних даних.

На основі отриманої інформації, що надходить щомісячно та щоквартально у звітах Мінприроди видається інформаційно-аналітичний огляд «Стан довкілля в Україні», який розповсюджується серед зацікавлених користувачів за їх запитами або зверненнями, якщо інше не передбачено угодами або змінами в постанові.

Функціонування Інформаційно-аналітичного центру Мінприроди забезпечує інформаційний обмін з регіональними центрами моніторингу довкілля, суб'єктами державної системи моніторингу довкілля, створення уніфікованого банку екологічних даних, проведення комплексного аналізу стану довкілля, тощо.

Постановою Кабінету Міністрів України від 05.12.2007 № 1376 затверджено Державну цільову екологічну програму проведення моніторингу навколишнього природного середовища [13].

Програма спрямована на поєднання зусиль усіх суб'єктів системи моніторингу щодо виключення дублювання та включення додаткових функцій з моніторингу, створення єдиної мережі спостережень після оптимізації її елементів та програм спостережень, вдосконалення технічного, методичного, метрологічного та наукового забезпечення функціонування єдиної мережі спостережень. З метою забезпечення інтеграції інформаційних ресурсів суб'єктів системи моніторингу довкілля передбачено створення та забезпечення функціонування єдиної автоматизованої підсистеми збору, оброблення, аналізу і збереження даних та інформації, отриманих в результаті здійснення моніторингу.

В межах Державної цільової екологічної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища, у тому числі, передбачено розширення мережі автоматизованих постів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в екологічно небезпечних містах.

Наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України було утворено Міжвідомчу комісію з питань здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря, що є постійно діючим консультативно-дорадчим колегіальним органом, основними завданнями якої є:

- 1) координація застосування суб'єктами моніторингу атмосферного повітря законодавства про охорону атмосферного повітря, єдиних методичних вимог у сфері державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря,

вимог Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та інших законодавчих актів;

2) аналіз та моніторинг реалізації програм державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря щодо їх відповідності законодавству про охорону атмосферного повітря та єдиним методичним вимогам у сфері державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря;

3) узгодження дій органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування пов'язаних із забезпеченням функціонування державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря, планів поліпшення якості атмосферного повітря та короткострокових планів дій.

4) аналіз практики застосування законодавства у сфері охорони атмосферного повітря та виконання планів поліпшення якості атмосферного повітря.

Детальний опис завдань, вимог до здійснення діяльності описаний в додатку до наказу про утворення Міжвідомчої комісії. Наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів також може бути змінений склад комісії [14].

1.2. Аналіз сучасних досліджень і публікацій у сфері моніторингу атмосферного повітря у містах

Постановою від 14 серпня 2019 р Кабінету Міністрів України «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» визначені основні завдання, вимоги до здійснення моніторингу повітря, список забруднюючих речовин, список зон агломерацій, що збігаються з межами відповідних адміністративно-територіальних одиниць, список агломерацій, що збігаються з межами відповідних міст, зазначених у Постанові. Серед вимог, зазначених у Постанові, зазначені такі, які потребують постійного вдосконалення системи моніторингу на окремих агломераціях, наприклад, необхідна мінімальна кількість постів

спостереження, інформування населення про стан повітря, прийняття управлінських рішень в короткі строки, проведення калібрування технічного обладнання, що використовується для здійснення моніторингу. Саме тому, важливим є проведення наукових досліджень, обґрунтувань та публікацій у сфері моніторингу атмосферного повітря [15].

Лідером в галузі моніторингу якості повітря в Києві є Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. На території столиці розміщено 16 стаціонарних постів спостереження за забрудненням повітря. Щоденні результати вимірювань (6 днів за неділю) чотирьох постів оперативно виставляються на сайті обсерваторії для вільного доступу. Відбір проб та їх аналіз проводиться чотири рази на добу – о 1.00, 7.00, 13.00 та 19.00 годинах. На жаль, на сайті вказані тільки дані з чотирьох постів спостереження, проте, за відповідних умов, можливо отримати дані інших постів також [16]. В столиці сьогодні працює кілька аналогічних систем. За даними [17], всього на території встановлено 328 постів моніторингу забруднення атмосфери, з яких працює 123 пости. Причому, ці пости належать різним власникам – державним та приватним підприємствам, місцевим органам самоврядування, мешканцям міста або створені в результаті виконання різноманітних проєктів. Крім цього, є системи моніторингу, що нараховують біля сотні станцій моніторингу, а є системи, що лише починають розвиватися і не мають ще жодного діючого посту [18].

Однією з основних проблем глобальної урбанізації є забруднення повітря, тому проводився теоретичний аналіз моделювання розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі для управління якістю повітря у містах. Атмосферною моделлю загалом можна назвати будь-яку математичну процедуру, результатами якої є оцінка якості навколишньої атмосфери. Методи та моделі аналізу стану навколишнього середовища за рахунок багатогранності та багатоаспектності підходів при побудові єдиної класифікації атмосферних моделей є складним завданням. З метою отримання достовірної інформації про стан атмосферного повітря примігстральних

територій міста використовуються різні методи аналізу та моделювання стану довкілля. Важливо враховувати також індивідуальний аспект кожного окремого міста. Проаналізовано декілька моделей та інструментів. Модель Лагранжа обчислює дисперсію забруднення повітря шляхом розрахунку безперервної траєкторії шлейфу. Вона рекомендується для оцінки розсіювання та осадження забруднюючих речовин навколо області нестационарного повітряного потоку. Гаусова модель дозволяє розраховувати концентрації забруднюючих речовин в області моделювання по прямій лінії між джерелом та точкою розрахунку для кожної години та отримати модель забруднення викидами примігистральні території міста. Статистичні моделі є корисним інструментом діагностики та передбачення якості повітря через інтерполяцію та екстраполяцію виміряних даних. Елементи моделей міських каньйонів можна використовувати для прогнозу концентрацій викидів на автомагістралях на коротких часових інтервалах (від годин до доби) [19].

Смертність серед населення є важливим показником загального стану здоров'я населення. Ризиками для здоров'я є фактори, які збільшують розвиток певних захворювань. Забруднення атмосферного повітря в Україні суттєво позначається на стані здоров'я населення, підвищуючи рівень як захворюваності, так і смертності. Особливо негативно впливає оксид вуглецю, діоксид сірки, діоксид азоту та тверді частинки. За даними моніторингу атмосферного повітря в 2019 році у 39 містах середня за рік концентрація формальдегіду в містах України, де проводились спостереження, була на рівні 2,7 ГДКс.д., діоксиду азоту – 1,5 ГДКс.д., фенолу – 1,3 ГДК с.д. Перевищення відповідних ГДК с.д. за середньорічними концентраціями спостерігалось для діоксиду азоту у 26 містах, формальдегіду – 25, твердих частинок – 11, фенолу – 9, оксиду вуглецю і фтористого водню – 3, оксиду азоту і аміаку – 2, діоксиду сірки та сажі – 1 місті [20]. Таким чином, забезпечення належної якості атмосферного повітря необхідно розглядати як пріоритетне завдання для покращенні демографічної ситуації [21].

Автори [22] дослідили проблеми моніторингу та розробили алгоритми роботи і програмні модулі системи аналізу. Вони передбачають два режими роботи: навчання або моніторинг, два види моніторингу (пошук заданої речовини або розпізнавання відомої), використання яких залежить від інтенсивності дестабілізуючих факторів та вимог тривалості контролю. За розробленими алгоритмами описана система може працювати у двох режимах:

- режим «навчання», для наповнення бібліотеки еталонних відгуків хімічних речовин;
- режим «моніторинг», для виявлення хімічних речовин в повітрі.

За першого режиму роботи системи через сенсорні матриці пропускають суміш повітря з відомою хімічною речовиною заданої концентрації. Після вимірювання інформаційно-аналітичних сигналів і попереднього математичного опрацювання вимірювальної інформації отримані дані піддаються фільтрації з використанням вейвлет-перетворень. Обчислені еталонні відгуки шуканих хімічних речовин разом з визначеними коефіцієнтами кореляції записують до бібліотеки зразкових відгуків системи.

За другого режиму певної роботи система може здійснювати два види моніторингу: «пошук речовини» та «розпізнавання хімічної речовини» [22].

Не менш важливими розробками є дослідження доцільності розміщення по чисельності постів спостереження за атмосферним повітрям. Однією з основних вимог для ефективного функціонування системи моніторингу атмосферного повітря є рівномірне просторове розміщення постів спостереження по всій території об'єкта дослідження. Автор запропонував методи геоінформаційного аналізу і моделювання, які назвав ефективними засобами оцінки просторового розподілу постів моніторингу атмосферного повітря для досліджуваної території [23].

Параметри моніторингу визначаються після аналізу повітря. У дослідженні, проведеному в Дніпрі, вивчено накопичення важких металів (Zn, Cu, Pb, Cd) у листі білої акації (*Robinia pseudoacacia*) як біоіндикатора якості повітря. Використовуючи атомно-абсорбційну спектрофотометрію, автори

виявили, що максимальні концентрації цинку становили 15-30 мг/кг, а також зафіксували наявність міді, свинцю та кадмію. Це свідчить про здатність міських насаджень акумулювати полютанти та слугувати природними фільтрами для покращення якості повітря в умовах промислового міста. [24].

Автори статті [25] стверджують, що щільність постів спостереження у містах є недостатньою, і також є складнощі із синхронізацією постів з транспортними засобами. Таким чином, запропоновано застосовувати інформаційно-вимірювальну універсальну систему, що базується на використанні пересувних пристроїв, яку можливо адаптувати до вимірювання концентрації СО в повітрі. Також, ця технологія передбачає можливість синхронізації спостережень стану атмосферного повітря з даними спостережень параметрів джерел його забруднення. Це дозволяє значно зменшити час на збирання результатів та збільшити обсяг і релевантність даних спостережень, якщо порівнювати з аналогами. Запропонований метод за рахунок його універсальності дозволяє візуалізувати результати стану повітря на ГІС-середовищах та прогнозувати якість повітря залежно від кількості транспорту та інших умов.

Автори статті [26] вважають, що серед першочергових заходів щодо стабілізації і поліпшення стану довкілля є розроблення системи моніторингу окремих екосистем. Необхідно впровадити системне удосконалення моніторингу атмосферного повітря та довкілля, та на основі вже існуючих, нових методик розрахунку постійно забезпечувати суб'єктів моніторингу сучасними приладами.

У роботі [27] також стверджується, що моніторинг атмосферного повітря є передовою проблемою країни. Тому, у курсі автора «Моніторинг довкілля» для навчання здобувачів вищої освіти введено аспекти та проблеми моніторингу, шляхи та методи їх вирішення, що дозволяє отримувати фахівців з технологій захисту навколишнього середовища, які зможуть на практиці вирішувати пріоритетні завдання моніторингу атмосферно повітря для міст, інших урбанізованих територій та всієї країни. Це також дозволить системно

та постійно отримувати удосконалення системи моніторингу довкілля або нові види методів дослідження та вирішення проблем забруднення повітря.

Також, варто зазначити, що забруднення атмосферного повітря викликає і навантаження на інші компоненти навколишнього середовища. Наприклад, забруднення ґрунтів важкими металами значною мірою корелює із рівнем забруднення атмосферного повітря. Атмосферні викиди промислових підприємств, транспорту та інших джерел викидів, що містять важкі метали, з часом осідають на поверхні землі, проникаючи в ґрунтовий покрив. Такий процес відбувається як у формі сухого осадження пилоподібних частинок, так і через атмосферні опади, які «змивають» забруднюючі речовини з повітря. Особливо це помітно в урбанізованих регіонах, де концентрація важких металів у повітрі часто перевищує допустимі норми, що призводить до накопичення цих елементів у поверхневих шарах ґрунту.

Таким чином, з цього виникає актуальність й дослідження рівня забрудненості ґрунтів. Так, наприклад, дослідник [28] обґрунтував індикатор, який виключає вплив буферної здатності ґрунту на фіксацію металів та враховує міграційний потенціал за конкретних умов просторового розподілу забруднення. Дослідження проводилися в межах міської екосистеми міста Дніпро – потужного центру металургії, машинобудування, металообробної промисловості та ракетно-космічного будівництва, тобто має цілий комплекс різних підприємств, що роблять викиди в атмосферне повітря.

Таким чином, атмосферне забруднення виступає не лише екологічною загрозою для повітряного середовища, а й чинником деградації ґрунтів, впливаючи на їхню родючість, мікробіологічну активність та загальний екологічний стан.

Взагалі, дуже актуальним питанням є зменшення викидів CO_2 вже багато років. Вивчення цього питання є на часі і зараз. Проте можна і використовувати цю речовину для моніторингу, як це запропонували автори статті [29]. Це стосується CO_2 -лазерної фотоакустичної спектроскопії. Інші методи також є. По-перше, обговорювалися основні звичайні методи, які зараз

застосовуються для виявлення газоподібних забруднювачів повітря, а також сучасні нові схеми виявлення. Автори розрізнили неспектроскопічні та спектроскопічні методи. Спектроскопічні методи представляють основний інтерес, оскільки вони пропонують кілька переваг, наприклад, одночасний моніторинг численних речовин. Фотоакустична спектроскопія є перспективним спектроскопічним методом завдяки своїй високій чутливості, широкому динамічному діапазону та порівняно простому експериментальному плану. Акцент робиться на селективності виявлення, яка часто може обмежити діапазон застосування техніки для моніторингу забруднення через відсутність потужних, безперервно настроюваних ІЧ-лазерних джерел. Таким чином, детально обговорюються теоретичні аспекти ПА-спектроскопії щодо виявлення слідових газів та багатокомпонентного аналізу. Деякі характеристики створеної портативної системи аудіосистеми описані для того, щоб проілюструвати корисність таких систем. Основи цієї технології та шлях до її вивчення відображаються у статтях минулого століття [30-40]

1.3 Сучасні підходи до розробки та реалізації систем моніторингу атмосферного повітря

Аналіз наукових праць авторів [41-43] щодо підходів до реалізації, удосконалення та методів систем моніторингу атмосферного повітря країни та різних міст, підтвердив, що єдиної уніфікованої системи не існує. Різні системи мають індивідуальні характеристики, кожна з них рекомендується для різних урбанізованих систем, промислових об'єктів, транспортної інфраструктури тощо. Зауважуються індивідуальні особливості регіонів, таких як кількість промислових об'єктів, джерел забруднення, щільність та кількість населення, ландшафтних особливостей, рози вітрів, наявності та стану природних екосистем, рекреаційних зон, рівню урбанізованості.

В статті [44] наголошується про те, що важливо мати декілька систем, створювати окремі моніторингові агентства, для порівняння, аналізів та різних екологічних завдань моніторингу як важливого фактору безпечного та здорового існування людства.

У дослідженні [45] автор зауважив, що основною проблемою у спробах підвищення ефективності систем моніторингу довкілля на муніципальному рівні в Україні є недосконалість організації підсистем спостереження й оцінювання, що у кінцевому випадку призводить до недостатньої обґрунтованості в підсистемі підтримки прийняття управлінських рішень, яка безпосередньо пов'язана з управлінням екологічною безпекою.

Один з критеріїв до підходу реалізації та розробки системи моніторингу атмосферного повітря є звернення громадян з питань погіршення якості атмосферного повітря. Так, автори статті [46] пояснили концепцію отримання звернень та їх обробка для подальших рішень. Запропоновано в місті Кременчук організувати муніципальну лінію звернень, телефоном або письмово, куди мешканці зможуть звертатися та встановити орієнтовану мінімальну кількість зареєстрованих протягом певного часу доби звернень мешканців міста. Для встановлення мінімальної кількості звернень громадян для організації невідкладного виїзду лабораторії доцільно дослідити базу даних існуючих зареєстрованих звернень. Аналіз звернень громадян щодо зауважень по якості атмосферного повітря дозволяє не лише визначити умови оперативного реагування на звернення, але й дозволяє проводити детальні аналізи причин, що спровокували велику кількість звернень, а саме: близькості до діючих техногенних об'єктів, магістралей руху автотранспорту тощо.

В м. Кременчук [47] визначено пріоритетні завдання у роботі міських систем моніторингу, серед яких, зокрема, встановлено доцільність мобільного контролю із застосуванням пересувних лабораторних комплексів, необхідність поточного інформування громадян і органів муніципальної влади та забезпечення термінового реагування на запити членів громади. Таким чином, запропонований розроблений проект планів оперативних

спостережень за якістю атмосферного повітря із застосуванням пересувної муніципальної екологічної лабораторії в місті Кременчуці.

У статті [48] автори визначили акценти практичної реалізації вимог до визначення місць розташування автоматизованих постів. Так, було запропоновано критерії обґрунтування місця розташування автоматичного стаціонарного посту постійного контролю в зоні ймовірного впливу промислового підприємства у м. Кривий Ріг з визначенням очікуваного внеску в забруднення атмосферного повітря. Визначено показники та характеристики впливу на процеси формування забруднення атмосферного повітря. Описано умови розташування постів спостереження саме для умов техногенно навантажених урбосистем.

Взагалі, проаналізувавши іноземні наукові праці, питання атмосферного повітря, а в особливості його якості, організації, технічного та правового забезпечення, актуальності та підвищення якості систем моніторингу повітря та в цілому довкілля, розробка нових концепцій щільно розглядається на протязі років і є важливим для всіх країн [49–51].

Сучасні підходи до розробки концепції є також дуже актуальними для розгляду. Наприклад, у статті [52] розглядається література про аналітичні прилади, які зазвичай використовуються для моніторингу летких органічних сполук в атмосферному повітрі.

У статті [53] автори пропонують систему моніторингу атмосферного середовища на основі IoT (Internet of Things), яка може ефективно спостерігати інформацію про забруднення повітря без обмеження місця або простору. Запропонована система складається з приладу для вимірювання атмосферного середовища та аналізатора атмосферного середовища, в якому система розроблена для збору та аналізу результатів вимірювань атмосферного середовища на сервері через мережу зв'язку LTE. Інформацію про атмосферне середовище, отриману від системи розробки, порівнювали з результатами спостережень, наданими Національною інформаційною системою моніторингу якості атмосферного повітря (NAMIS) [54].

Стаття [55] присвячена розробці основних принципів організації та підвищення ефективності моніторингу стану атмосферного повітря для мобільних джерел забруднення міського середовища. Першим із мобільних джерел забруднення автори вважають автомобільний транспорт. У статті автори відводять особливу роль моніторингу міського середовища атмосферного повітря міст та пропонують вирішення проблеми на основі розробки основних принципів організації спостережень за станом атмосферного повітря з урахуванням внеску рухомих атмосферних джерела забруднення повітря.

У роботі [56] представлені завдання, процедури та інструментальні тенденції в аналітиці та моніторингу забруднення повітря. Також обговорюється класифікація методів та аналітичних прийомів, що використовуються для дослідження атмосферного повітря. Проте автор зазначає, що більш детальний опис основних тенденцій моніторингу атмосферного повітря можна знайти в інших опублікованих його оглядах, проте пише, що слід усвідомлювати, що такі роботи є значною мірою дуже суб'єктивними і залежать як від ступеня знання літературних даних, так і від особистого досвіду.

Існує досвід використання дифузійного пробовідбірника «Radiello». Він забезпечує вимірювання з відносним стандартним відхиленням повторюваності, що становить від 1,5 до 4,0%, високою швидкістю відбору проб, оціненою до $98,7 \pm 2,8$ мл/хв за стандартних умов (температура: $19,9 \pm 0,5$ °C і відносна вологість: $52,9 \pm 3,2\%$). Моніторингу атмосферного повітря з використанням дифузійного пробовідбірника «Radiello» присвячено декілька наукових статей, кожна з яких пояснює різні властивості, методи, індивідуальні особливості цього об'єкту, а також швидкість зношування, реакція на різні забруднюючі речовини тощо [57–63].

У роботі [64] представлені результати дослідження якості атмосферного повітря в Тчеві (прилегла до р. Вісла) за допомогою вказаного попередньо дифузійного пасивного пробовідбірника Radiello щодо вмісту забруднюючих

речовин. Процедура, що застосовувалася під час відбору проб з повітря, використовувала техніку пасивного відбору проб. Для визначення сполук в атмосферному повітрі застосовували двоступеневу техніку термічної десорбції в поєднанні з газовою хроматографією. З метою попереднього визначення потенційних джерел викидів забруднюючих речовин проведено статистичний аналіз. Це визначило взаємодію між заданими рівнями концентрації сполук в атмосферному повітрі для зони моніторингу.

Перша система моніторингу в реальному часі з використанням техніки атмосферної інверсії була розглянута у статті [65] для міста Давос, Швейцарія. Автори представляють тут першу операційну систему, здатну відстежувати щоденні оцінки викидів майже в реальному часі, використовуючи систему мезомасштабної атмосферної інверсії над містом. Два прилади, які безперервно вимірювали співвідношення парникових газів в атмосфері, були розміщені в двох місцях: одна була розташована в міській зоні, а інша була за межами долини в навколишніх горах. На обох ділянках постійно вимірювали вміст вуглекислого газу, метану та оксиду вуглецю. Мезомасштабна модель атмосфери для дослідження погоди та прогнозування в чотиривимірному режимі засвоєння даних була використана для моделювання транспортування парникових газів над долиною Давос з роздільною здатністю 1,3 км. Дана система ще потребує вдосконалення та кінцевої реалізації.

1.4 Застосування інформаційно-аналітичних систем в моніторингу атмосферного повітря

Важливим завданням моніторингу атмосферного повітря в цілому є вчасне висвітлення результатів моніторингу для населення, державних департаментів та установ, що приймають управлінські рішення, ЗМІ тощо. Після отримання даних про стан повітря, ці дані повинні оброблятися та надаватися у вільний доступ. Так, у роботі [66] авторами показано, що в Україні одним із основних питань реалізації сучасної екологічної політики та

систем моніторингу є якісне інформаційне забезпечення прийняття рішень у галузі екологічного управління. Здійснено аналіз можливостей геоінформаційних технологій під час розв'язання завдань управління екологічною безпекою довкілля. Описано основні можливості та переваги спеціалізованих інформаційно-аналітичних систем оцінки стану екологічної безпеки у разі забруднень атмосфери. Наведено приклади використання цих систем. Актуальність питання пояснено політикою держави про сталий розвиток України, її модель [67–68].

У роботі [69] проаналізовано підхід у комплексі до аналізу екологічної безпеки міста, що містить розробку бази даних моніторингу, методи аналізу та обробки інформації про забруднення атмосфери, сучасні ГІС-технології побудови карт з шарами, джерелами забруднення та виявлення територій підвищеного ризику. Для вдосконалення змістовної інтерпретації даних моніторингу та результатів обробки і аналізу розроблено систему екологічних індексів, які можна безпосередньо наносити на електронну карту міста, візуалізуючи території з різним екологічним статусом на прикладі міста Київ.

Для вирішення задач у сфері охорони атмосферного повітря проаналізована спеціалізована автономна система AISEEM, що розроблена в ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. Визначено основні переваги та недоліки, і на основі проведеного аналізу визначено основні вимоги для подальшого розвитку та удосконалення зазначеної системи [70]. Автори вважають, що це питання є на часі для вирішення проблем моніторингу атмосферного повітря на рівні урбанізованого регіону.

У роботі [71] розглянуто ІАС моніторингу вуглевидобувного району, також основні засади моніторингу на гірничих підприємствах викладена в [72]. При цьому, запропоновано інформаційну методику аналізу результатів моніторингу для обґрунтування постів спостережень. Також, у роботі [73] презентована система «Elfintest», що спрямована на обробку даних моніторингу довкілля на основі кластеризації.

Більшість з вищезазначених робіт спрямована на розв'язання конкретних завдань моніторингу шляхом вдосконалення програмного забезпечення при індивідуальних умовах міста чи населеного пункту, будь-якої урбанізованої території. Тому, кожна методика повинна розглядатися місцевими службами та прагне адаптування по місцю.

Дуже важливим завданням моніторингу атмосферного повітря є прийняття управлінських рішень для швидкого реагування та вирішення проблем, що стосуються цього. Так, наприклад, у роботі [74] пояснено важливість розробки інформаційно-аналітичних систем зі швидким передаванням даних на об'єкти прийняття рішень для запобігання та усунення критичних ситуацій.

Інформаційні системи моніторингу повітря в реальному часі описані в роботі [75], в особливості робота ґрунтується на складному моделюванні і вимагають застосування додаткових програмних модулів для забезпечення дотримання встановлених термінів. Стаття [76] пропонує інноваційну платформу моніторингу для зондування навколишнього середовища, яка підтримується хмарою та повсюдною архітектурою, використовує потужність обробки великих даних для ефективного, дієвого, сталого та пасивного еко-середовища. Технології великих даних разом із широким використанням хмарних і високопродуктивних обчислень створюють нові можливості для науки з інтенсивним використанням даних у мультидисциплінарній агро-екологічній сфері. Теоретична основа представлена для структурування та аналізу інтенсивних даних і застосована до трьох тематичних досліджень, разом охоплюючи широкий спектр технологій і аспектів, пов'язаних з використанням великих даних. Тому рекомендується зосередити зусилля в агроекологічній сфері на питаннях різноманітності та достовірності [77].

У статті [78] запропоновано підхід до підтримки прийняття аналітичних рішень на основі інтеграції технології OLAP і формального концептуального аналізу. Розглянуто основи моделювання предметної області OLAP. Формально описано побудову аналітичної моделі з експертними знаннями як

решітки формальних кубів-концептів. Представлено використання запропонованого підходу для побудови аналітичної моделі процедур муніципальних закупівель. Побудована інтегральна аналітична модель предметної області включає всі можливі комбінації аналізованих об'єктів, проте масштабування системи потребує вдосконалення.

Авторами роботи [79] проведений детальний аналіз діючої системи інформаційно-аналітичного забезпечення безперервного отримання та обробки інформації про всі зміни показників, що відображають екологічне положення вугільного регіону. Надані пропозиції з екологічного обґрунтування процесів зняття шахт з експлуатації.

Системи моніторингу навколишнього середовища в режимі реального часу, раннього попередження та підтримки прийняття рішень вимагають розширеного управління оперативними даними, тобто останніми даними датчиків, необхідними для оцінки поточної ситуації. У статті [80] автори оцінили придатність чотирьох моделей даних і відповідних технологій баз даних – бази даних документів MongoDB, реляційної бази даних PostgreSQL, сервера словникових даних Redis і бази даних часових рядів InfluxDB – для роботи в якості оперативної бази даних для систем EMEWD. Для кожної з оцінюваних баз даних розроблено альтернативні моделі даних для представлення даних часових рядів і експериментальна оцінка кожної з них.

Висновки до розділу 1

Аналіз вітчизняних та закордонних, сучасних та класичних статей та наукових робіт показав, що є дійсно великий фундамент для вирішення питань моніторингу атмосферного повітря. При цьому, методик та технологій є велика різноманітність. На жаль, єдиної методики для всіх урбанізованих територій та місцевостей немає, кожна з них має свої індивідуальні особливості місцевості, щільності населення, погодних умов, кількості промислових об'єктів та їх щільність тощо. Тому, наразі доцільним є

врахування цих індивідуальних особливостей та підбір системи моніторингу повітря, та її адаптування, що варто вже виконувати на місцевому рівні.

Недосконала є система швидкого реагування на виявлення недоліків. Світові науковці пропонують використання відкритих баз даних та інші зазначені у розділі методи, проте в Україні наразі система моніторингу виконує завдання більш інформування населення, ніж прийняття швидких управлінських рішень для коригування і виправлення критичної ситуації. Тому, доцільно буде поставити завдання – вдосконалити систему моніторингу урбанізованих територій, агломерацій та муніципальних об'єктів, з адаптуванням її до індивідуальних особливостей, а також розробити рекомендації для вдосконалення системи швидкого реагування та прийняття управлінських рішень при виявленні критичного чи проблемного становища.

Результати досліджень відображені у публікаціях [72].

РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ МУНІЦИПАЛЬНИХ ПРОМИСЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ ТА АГЛОМЕРАЦІЙ

2.1. Виявлення недоліків існуючої схеми розміщення стаціонарних постів спостереження на території агломерації

Забруднення атмосферного повітря є одним з найбільших екологічних проблем сучасності. Промислові комплекси та агломерації, які є основними джерелами викидів забруднюючих речовин у повітря, викликають серйозні наслідки для здоров'я населення та стану навколишнього середовища. Для забезпечення ефективного контролю та удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій необхідно використовувати науково-обґрунтовані методологічні засади.

Збільшення промислової діяльності та зростання кількості підприємств призводять до збільшення викидів забруднюючих речовин у повітря. Це ставить перед суспільством нагальну потребу у контролі та удосконаленні системи моніторингу атмосферного повітря, щоб гарантувати безпеку населення та зберегти природні ресурси.

Проведення наукових досліджень у цій галузі дозволяє розробити методологічні засади для удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря. Впровадження таких засад дозволить забезпечити точний та надійний (оперативний) контроль за рівнем забруднення повітря в муніципальних промислових комплексах та агломераціях. Крім того, це дозволить вчасно виявляти можливі надзвичайні ситуації та приймати ефективні заходи для зменшення впливу промисловості на довкілля.

Таким чином, удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій є актуальною проблемою, яка потребує негайного вирішення.

Аналіз стану системи моніторингу атмосферного повітря в Україні показав, що система має багато недоліків з технічно організаційних питань. Також суттєвим недоліком є наявна законодавча база та адміністративне управління системою моніторингу. Система моніторингу потребує чіткого плану вдосконалення та аналізу і розробки методологічних засад у питанні обґрунтування структури системи моніторингу повітря на промислових комплексах та агломераціях. У зв'язку з цим, зростає необхідність у налагодженні ефективної системи спостереження, яка забезпечуватиме вчасну реакцію на негативні події та допомагатиме виявляти та запобігати можливим загрозам.

Одним з ключових елементів такої системи є стаціонарні пости спостереження, які розміщуються на стратегічно важливих територіях. Вони дозволяють здійснювати нагляд за об'єктами та територіями у режимі реального часу, фіксувати порушення громадського порядку, виявляти потенційні загрози та швидко реагувати на них. Розміщення стаціонарних постів спостереження має велике значення для оперативності та ефективності всієї системи спостереження.

Проаналізуємо процес спостереження за станом атмосфери з використанням стаціонарних постів на території агломерації Дніпро. Іноді виділяють Дніпро-Кам'янську агломерацію.

Схема розташування пунктів спостереження на території агломерації Дніпро зазначена на рис. 2.1.

На території агломерації Дніпро наявні понад 200 різних промислових підприємств, що утворюють понад 100 різних видів забруднюючих речовин у навколишнє середовище, здебільшого в атмосферне повітря. Викиди надходять близько з 7000 джерел, серед яких 89% є організованими. Міські підприємства розташовані в чотирьох промислових зонах: західна, лівобережна, південна і східна. У цілому за календарний рік від промисловості у Дніпрі близько 90 000 тонн шкідливих речовин потрапляють в атмосферне повітря. Не менше 90% від об'єму забруднюючих речовин потрапляють у

повітря через діяльність металургійних та енергетичних промислових компаній [81, 82].

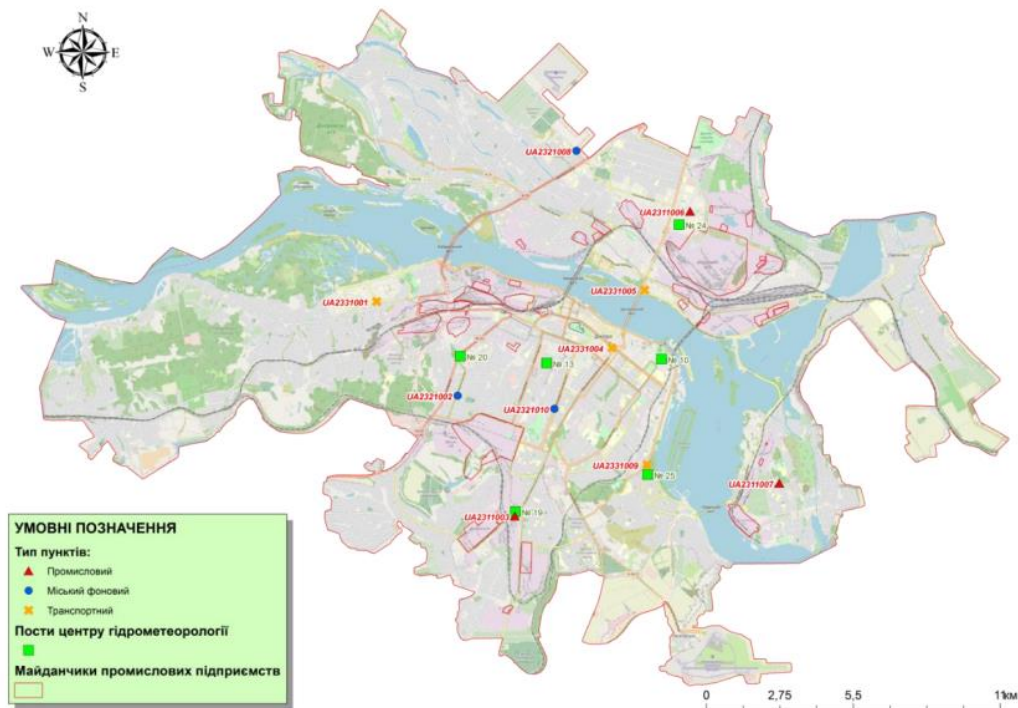


Рисунок 2.1 – Схема розташування пунктів спостереження агломерації
Дніпро

Відповідно до наказу Міністерства внутрішніх справ України від 21 квітня 2021 року № 300 «Про порядок розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях», встановлені основні вимоги та умови для розміщення таких пунктів спостережень. Для агломерації міста Дніпро, яке має населення приблизно 1 мільйон жителів і перевищення верхнього порогу оцінювання за твердими речовинами, мінімальна кількість пунктів спостережень становить 6.

Крім загальних положень наказу, при виборі місць розташування пунктів спостережень були враховані критерії, що наведені нижче.

- просторовий розподіл промислових підприємств та обсягів викидів пріоритетних забруднюючих речовин від основних джерел забруднення атмосфери;

- кількість та щільність населення в адміністративних районах міста та характеристика житлової забудови;
- рельєф місцевості для аналізу умов розсіювання забруднюючих речовин;
- інтенсивність руху транспорту як джерела забруднення атмосфери;
- скарги мешканців міста на погіршення стану атмосферного повітря в їхніх місцях проживання;
- наявність постів спостереження центру гідрометеорології;
- результати попередніх вимірів тривалих та короткотривалих вимірювань та їх статистична обробка з використанням інтерполяції даних в агломерації [83].

Кожен пост спостереження за атмосферним повітрям повинен мати необхідні документи [3].

У 2020 році було введено «Основні засади екологічної політики України до 2030 року», які передбачають «впровадження екосистемного підходу у галузеву політику та удосконалення системи інтегрованого екологічного управління». Починаючи з 2021 року в агломерації «Дніпро» проводиться систематичний моніторинг рівня забруднення атмосферного повітря, який здійснюється шістьма стаціонарними постами спостереження Дніпропетровського регіонального центру з гідрометеорології. На цих постах вимірюються концентрації різних забруднюючих речовин, таких як пил, діоксид сірки, оксид вуглецю, оксид азоту, діоксид азоту, сірководень, фенол, аміак та формальдегід. Збір і обробка даних проводяться неавтоматизовано і базуються на лабораторно-хімічних методах аналізу проб, які здійснюються 2–4 рази на добу в залежності від речовини [84].

Головним завданням системи моніторингу атмосферного повітря є здійснення постійного контролю за рівнем забруднення повітряного середовища, своєчасне виявлення перевищень допустимих концентрацій забруднюючих речовин, а також інформування населення кожної окремої агломерації, району або промислового комплексу щодо фактичної якості

повітря. Ця система відіграє важливу роль у прийнятті своєчасних управлінських та екологічних рішень у разі фіксації потенційно небезпечної або кризової ситуації в довкіллі. Одним із ключових її елементів є організація ефективного оповіщення населення про можливі ризики негативного впливу забрудненого повітря, зокрема на вразливі або чутливі групи людей, такі як діти, особи похилого віку, пацієнти із хронічними захворюваннями тощо [85, 86].

В наявних системах спостереження за атмосферним повітрям України збір і обробка інформації не автоматизовані і вживається не для прийняття управлінських рішень у разі критичної чи кризової ситуації, а для статистичного аналізу. Так, аналіз повітря в агломераціях відбувається з понеділка по п'ятницю (робочі дні) дні чотири рази на добу: о 1, 7, 13 і 19 годинах [87].

У місті Дніпро зараз проводиться систематичний моніторинг якості повітря, який здійснюється Дніпропетровським обласним центром з гідрометеорології на 6 стаціонарних постах. Для цього використовуються вибіркові періодичні вимірювання забруднення атмосферного повітря:

- пост спостереження №10 – парк ім. Шевченка;
- пост спостереження №13 – вул. Філософська, 94;
- пост спостереження №19 – вул. Краснопільська, 11;
- пост спостереження №20 – пр. Мазепи, 38;
- пост спостереження №24 – вул. Богдана Хмельницького, 20;
- пост спостереження №25 – пр. Героїв, 21.

Діючі індикативні пости моніторингу за атмосферним повітрям мають певний перелік датчиків, які надають можливість отримувати інформацію про параметри навколишнього середовища, серед яких може бути як метеорологічні чи кліматичні умови, так і концентрації забруднюючих речовин у повітрі. Нижче наведено список ідентифікаційних станцій міста Дніпро та їх технічне оснащення.

Пост №10 розташований біля входу до міського парку імені Тараса Шевченка (Додаток Б1). Місце встановлення пункту було вибрано з урахуванням низки важливих чинників, зокрема щільної житлової забудови, інтенсивності антропогенного навантаження та високої густоти населення в цій частині міста, яка становить 2560 осіб на квадратний кілометр. Така локація забезпечує можливість отримання репрезентативних даних про стан атмосферного повітря в умовах міського середовища. Відповідні значення показників концентрацій забруднюючих речовин, зареєстрованих на посту №10, зазначені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані з посту №10

Забруднююча речовина	ГДК, мг/м ³ , середньодобове	Середнє	ГДК (в долях)
Пил	0,15	0,32	2,11
Діоксид сірки	0,05	0,04	0,88
Оксид вуглецю	3	2	0,66
Діоксид азоту	0,6	0,078	0,13
Сірководень	0,008	0,008	1
Фенол	5	0,014	0,003
Аміак	0,04	0,098	0,519
Формальдегід	0,035	0,018	0,519

В табл. 2.2. зазначене технічне оснащення пункту спостереження №10 в залежності від виду досліджуваної речовини або категорії та документація до нього.

Таблиця 2.2 – Технічне оснащення посту №10

Речовина	Прилади	Назва документу
Метео-параметри	Секундомір № 8051; Барометр БАММ № 1970; Анемометр МС-13 № 21373	свідоцтво про калібрування від 07.2021 № 99-04-32/383; від 08.2021 № 8/26; від 05.2020 № 01-04-34/70 міжповірочний інтервал – 2 роки

Речовина	Прилади	Назва документу
Пил	Установка аспіраційна УАС-100 Ротаметри № 36,39	свідоцтва про повірку від 10.2021 № 15-0/22412/562, 566
Діоксид сірки	Електроаспіратор М- 822; Ротаметр Р5 № 119; Секундомір № 8051	свідоцтво про повірку від 13.10.2021 № 15-0/22412/575; свідоцтво про калібрування від 07.2021 № 99-04-32/383
Оксид вуглецю	Секундомір № 8051	свідоцтво про калібрування від 07.2021 № 99-04-32/383
Діоксид азоту	Електроаспіратор М- 822; Ротаметр Р1 № 30.	свідоцтво про повірку від 13.10.2021 № 15-0/22412/580
Сірководе нь	Електроаспіратор М- 822, Ротаметр Р 5	свідоцтво про повірку від 13.10.2021 № 15-0/22412/585
Фенол	Електроаспіратор М- 822 Ротаметр Р 20 № 103	свідоцтво про повірку від 13.10.2021 № 15-0/22412/561
Аміак	Електроаспіратор Ротаметр Р 20 № 110.	свідоцтво про повірку від 13.10.2021 № 15-0/22412/573
Формальд егід	Електроаспіратор Ротаметр Р 1 № 276	свідоцтво про повірку від 13.10.2021 № 15-0/22412/576

Пост №13 розташований за адресою: вул. Філософська, 94, (Центральний район) (Додаток Б2).

В табл. 2.3. зазначене технічне оснащення пункту спостереження №13 в залежності від виду досліджуваної речовини або категорії та документація до нього.

Таблиця 2.3 – Технічне оснащення посту №13

Назва речовини	Назва приладу	Назва документу
Метео-параметри	Секундомір № 5427 Барометр М– 98 № 297 Анемометр МС–13 № 14477	Свідоцтво про калібрування від 07.2021 № 99–04–32/385 Свідоцтво про калібрування від 08.2021 № 8/29, від 05.2020 № 01–04–34/71 (міжповірочний інтервал – 2 роки)
Діоксид сірки	Електроаспіратор М– 822 Ротаметр Р 20 № 124	Свідоцтво про повірку від 13.10.2021 № 15–0/22412/563
Оксид вуглецю	Секундомір № 5427	Свідоцтво про калібрування від 07.2021 № 99–04–32/385
Діоксид та оксид азоту	Електроаспіратор М– 822 Ротаметр Р 1 № 429	Свідоцтво про повірку від 13.10.2021 № 15–0/22412/581
Сірководень	Електроаспіратор М– 822 Ротаметр Р20 № 133	Свідоцтво про повірку від 13.10.2021 № 15–0/22412/568

Показники, отримані з цього поста, наведені в табл. 2.4. Місце вибрано з огляду на щільну житлову забудову, інтенсивний рух автотранспорту та високу щільність населення, яка складає 4689 осіб/м².

Таблиця 2.4 – Дані з посту №13

Забруднююча речовина	ГДК, мг/м ³ , середньодобове	Середнє	ГДК (в долях)
Оксид азоту	0,06	0,04	0,77
Діоксид сірки	0,05	0,037	0,74
Оксид вуглецю	3	2,16	0,72
Діоксид азоту	0,6	0,097	0,161
Сірководень	0,008	0,0098	1,229

Пост №19 розташований за адресою: вул. Краснопільська, 11, у Чечелівському районі міста (Додаток Б3).

Це місце знаходиться поруч із зоною концентрації підприємства «Дніпрошина», який має значний техногенний вплив на довкілля району. Щільність населення в Чечелівському районі становить 2385 осіб/м², що є досить високим соціально-демографічним показником. Показники, отримані з цього поста, а також перелік забруднюючих речовин, що реєструвалися протягом періоду спостережень, наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Дані з посту №19

Забруднююча речовина	ГДК, мг/м ³ , середньодобове	Середнє	ГДК (в долях)
Пил	0,15	0,35	2,33
Діоксид сірки	0,05	0,024	0,486
Оксид вуглецю	3	2,5	0,83
Діоксид азоту	0,6	0,1	0,169
Сірководень	0,008	0,0098	1,229
Формальдегід	0,035	0,02	0,58

В табл. 2.6. зазначене технічне оснащення пункту спостереження №19 в залежності від виду досліджуваної речовини або категорії та переліку документації до нього.

Таблиця 2.6 – Технічне оснащення посту №19

Назва речовини	Назва приладу	Назва документу
Метеопараметри	Секундомір № 0173 Барометр М– 98 № 519 Анемометр МС–13 № 6737	Свідоцтво про калібрування від 07.2021 № 99–04–32/381 Свідоцтво про калібрування від 08.2021 № 8/27 Свідоцтво про калібрування від 05.2020 № 01–04–34/64

Продовження таблиці 2.6

Назва речовини	Назва приладу	Назва документу
Пил	Установка аспіраційна УАС–100	Лічильник газовий G6 № 1406551, дата повірки 4 квартал 2016, міжповірочний інтервал – 5 років
Діоксид сірки	Електроаспіратор М–822 № 2568 з Ротаметрами № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2–0252–20, дійсний до 11.2021
Оксид вуглецю	Секундомір № 0173	Свідоцтво про калібрування від 07.2021 № 99–04–32/381
Діоксид азоту	Електроаспіратор М–822 № 2568 з ротаметрами № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2–0252–20, дійсний до 11.2021
Сірководень	Електроаспіратор М–822 № 2568 – ротаметрами № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2–0252–20, дійсний до 11.2021
Формальдегід	Електроаспіратор М–822 № 2568 з ротаметри № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2–0252–20, дійсний до 11.2021

Пост №20 розташований за адресою: пр. Мазепи, 38, у Новокодацькому районі міста, в промисловій зоні (Додаток Б4).

Це місце вибрано через високу концентрацію підприємств, таких як ТОВ «Барс», Завод металоконструкцій тощо. Крім того, локація розташована поблизу автомагістралі з інтенсивним транспортним рухом, що є суттєвим джерелом забруднення повітря. Така комбінація промислового і транспортного навантаження зумовлює підвищений рівень техногенного впливу на повітря. Тому дані, отримані з цього поста, мають значення для аналізу якості повітря. Показники, зафіксовані на цій локації, наведені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Дані з посту №20

Забруднююча речовина	ГДК, мг/м ³ , середньодобове	Середнє	ГДК (в долях)
Пил	0,15	0,23	1,55
Діоксид сірки	0,05	0,023	0,46
Оксид вуглецю	3	3,33	1,11
Діоксид азоту	0,6	0,086	0,144
Сірководень	0,008	0,017	2,229
Фенол	5	0,018	0,0036
Аміак	0,04	0,1	2,66
Формальдегід	0,035	0,017	0,486

Таблиця містить порівняльні дані щодо рівнів забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за середньодобовими концентраціями та за середніми показниками. У ній представлено вісім основних забруднюючих речовин: пил, діоксид сірки, оксид вуглецю, діоксид азоту, сірководень, фенол, аміак та формальдегід, які є типовими для міських промислових територій із підвищеним техногенним навантаженням. Для кожної речовини вказані гранично допустимі концентрації (ГДК) у мг/м³, середні за вказаний період концентрації в повітрі, а також відповідні ГДК у долях, що дозволяє наочно оцінити рівень перевищення. Таблиця дозволяє порівняти реальні концентрації з нормативними показниками, що особливо важливо для всебічного аналізу екологічного стану середовища, формування висновків про ступінь забруднення та обґрунтування природоохоронних заходів.

В табл. 2.8. зазначене технічне оснащення пункту спостереження №20 в залежності від виду досліджуваної речовини або категорії та перелік документації до кожного з приладів, встановлених на зазначеному пості спостереження.

Таблиця 2.8 – Технічне оснащення посту №20

Назва речовини	Назва приладу	Документація
Метеопараметри	Секундомір № 3445, Барометр М-98 № 540, Анемометр МС-13 № 8502	Свідоцтва про калібрування: 07.2021 № 99-04-32/384, 08.2021 № 8/28, 05.2020 № 01-04- 34/63
Пил	Установка аспіраційна УАС-100, Лічильник газовий G6 № 1406536	Дата повірки 4 кв. 2016, міжповірочний інтервал – 5 років
Діоксид сірки	Електроаспіратор М- 822, Ротаметр Р20 № 542	Свідоцтво про повірку: 13.10.2021 № 15-0/22412/569
Оксид вуглецю	Секундомір № 3445	Свідоцтво про калібрування: 07.2021 № 99-04-32/384
Діоксид азоту	Електроаспіратор М- 822 № 2200, Ротаметри № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2-0251-20, дійсний до 11.2021
Сірководень	Ротаметр Р20 № 1261	Свідоцтво про повірку: 13.10.2021 № 15-0/22412/571
Фенол	Електроаспіратор М- 822 № 2200, Ротаметри № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2-0251-20, дійсний до 11.2021
Аміак	Електроаспіратор М- 822 № 2200, Ротаметри № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2-0251-20, дійсний до 11.2021
Формальдегід	Електроаспіратор М- 822 № 2200, Ротаметри № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2-0251-20, дійсний до 11.2021

Пост №24 розташований за адресою: вул. Богдана Хмельницького, 20, в Індустріальному районі міста, який характеризується значною кількістю промислових підприємств та щільною житловою забудовою (Додаток Б5).

Вибір цієї локації зумовлений необхідністю моніторингу якості атмосферного повітря у районах із підвищеним техногенним навантаженням та інтенсивними транспортними потоками, що можуть впливати на рівень забруднення. Щільність населення в Індустріальному районі складає 3004 осіб/м², що свідчить про високий рівень урбанізації та соціального навантаження на довкілля. Регулярне фіксування показників на цьому посту дозволяє своєчасно виявляти перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин, а також проводити аналіз динаміки змін якості повітря. Показники, отримані з поста, систематизовані та наведені в табл. 2.9, що дає змогу використовувати їх у подальших дослідженнях і для розробки природоохоронних заходів.

Таблиця 2.9 – Дані посту №24

Забруднююча речовина	ГДК, мг/м ³ , середньодобове	Середнє	ГДК (в долях)
Пил	0,15	0,4	2,66
Діоксид сірки	0,05	0,025	0,5
Оксид вуглецю	3	2,5	0,83
Діоксид азоту	0,6	0,09	0,15
Сірководень	0,008	0,02	2,5
Фенол	5	0,01	0,0033

У табл. 2.10 зазначене технічне оснащення пункту спостереження №24 відповідно до виду досліджуваної речовини або категорії забруднення, а також пов'язана супровідна технічна документація до нього, включаючи методичні рекомендації, технічні паспорти, інструкції з експлуатації, протоколи перевірки обладнання та інші супровідні матеріали.

Таблиця 2.10 – Технічне оснащення посту №24

Назва речовини	Назва приладу	Документація
Метеопараметри	Секундомір № 0156, Барометр М-67 № 1724, Анемометр МС-13 № 14036	Свідоцтва про калібрування: 07.2021 № 99-04-32/380, 08.2021 № 8/25, міжповірочний інтервал – 2 роки
Пил	Установка аспіраційна УАС-150, Ротаметри Р50 № 042, 044	Свідоцтво про повірку: 13.10.2021 № 15-0/22412/564, 570
Діоксид сірки	Електроаспіратор, Ротаметр Р20 № 792	Свідоцтво про повірку: 13.10.2021 № 15-0/22412/572
Оксид вуглецю	Секундомір № 0156	Свідоцтво про калібрування: 07.2021 № 99-04-32/380
Діоксид азоту	Ротаметр Р1 № 4915	Свідоцтво про повірку: 13.10.2021 № 15-0/22412/579
Сірководень	Ротаметр Р5 № 414	Свідоцтво про повірку: 13.10.2021 № 15-0/22412/584
Фенол	Ротаметр Р20 № 89 10 71	Свідоцтво про повірку: 13.10.2021 № 15-0/22412/574

Пост №25 розташований за адресою: пр. Героїв, 21, у Соборному районі міста (Додаток Б6). Його місце розташування обумовлено близькістю до Придніпровської ТЕС, що має значний факел викидів забруднюючих речовин і знаходиться майже на межі зони максимальних концентрацій хімічно небезпечних компонентів повітря. Крім того, пост розташований поблизу автомагістралі з інтенсивним транспортним рухом, високим рівнем шуму, вібрації та в зоні щільної житлової забудови з активною соціальною інфраструктурою. Показники, отримані з цього поста, наведені в табл. 2.11 і використовуються для оцінки ризиків для здоров'я населення.

Таблиця 2.11 – Дані з пункту №25

Забруднююча речовина	ГДК, мг/м ³ , середньодобове	Середнє	ГДК (в долях)
Діоксид сірки	0,05	0,02	0,463
Оксид вуглецю	3	2,1	0,72
Діоксид азоту	0,6	0,09	0,156
Сірководень	0,008	0,085	1,0625

В табл. 2.12. зазначене технічне оснащення пункту спостереження №25 в залежності від виду досліджуваної речовини або категорії та документація до нього.

Таблиця 2.12 – технічне оснащення пункту №25

Назва речовини	Назва приладу	Документація
Метеопараметри	Секундомір № 0152	Свідоцтво про калібрування від 07.2021 № 99-04-32/386
	Барометр М-98 № 651	від 03.2020 № 9
	Анемометр МС-13 № 21459	від 05.2020 № 01-04-34/65,
Діоксид сірки	Електроаспіратор М-822 № 88495 з ротаметрами № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2-0250-20, дійсний до 11.2021
Оксид вуглецю	Секундомір № 0152	Свідоцтво про калібрування від 07.2021 № 99-04-32/386
Діоксид азоту	Електроаспіратор М-822 № 88495 з ротаметрами № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2-0250-20, дійсний до 11.2021
Сірководень	Електроаспіратор М-822 № 88495 з ротаметрами № 1, 2, 3, 4	Сертифікат від 11.2020 № 2-0250-20, дійсний до 11.2021

Таким чином, у місті Дніпро, на додаток до постів гідрометеорологічного центру, ще діють 2 пости автоматично моніторингу забруднення повітря, що працюють безперервно:

– автоматичний пост безперервного моніторингу за адресою просп. Сергія Нігояна, 77, що належить Департаменту екологічної політики Дніпровської міської ради (табл. 2.13);

– автоматичний пост безперервного моніторингу за адресою, вул. Осіння, 6, що належить промислового підприємству ТОВ «МЗ «Дніпросталь» [88] (табл. 2.13).

Таблиця 2.13 – Технічне оснащення постів КП ДМР

Місце розташування пункту	Найменування юридичної особи	Дата введення в експлуатацію	Перелік забруднювачів	Режим спостережень	Метод оцінювання	Дані щодо сертифікації обладнання
м. Дніпро, проспект Сергія Нігояна, 77	Комунальне підприємство «ЕКОПОЛІС» Дніпровської міської ради	2017 р.	діоксид сірки, діоксид азоту, оксид вуглецю, озон	Цілодобово-тестовий	У стадії реконструкції	Відсутні
м. Дніпро, вул. Осіння, 6	Комунальне підприємство «ЕКОПОЛІС» Дніпровської міської ради	2013 р.	пил оксид азоту	Цілодобово-тестовий	МПУ 313\11–2015 МПВБД	У стадії калібрування і повірки, Свідоцтво № 51 від 17.01.2018

Опис приладів наведено в табл. 2.14.

Таблиця 2.14 – Список приладів, встановлених на постах

Назва пристрою	Що вимірює / Для чого використовується	Напрямок	Наукова значимість
Секундомір	Вимірювання часу спостережень	Висока точність вимірювань	Застосовується для точного визначення моментів відбору проб
Барометр	Вимірювання атмосферного тиску	Допомагає визначати зміни погоди	Використовується у прогнозуванні погодних умов
Анемометр МС-13	Вимірювання швидкості та напрямку вітру	Стійкість до екстремальних погодних умов	Ключовий прилад для аналізу розсіювання забруднювачів
Установка аспіраційна УАС-100	Відбір проб повітря для аналізу	Працює за принципом примусового забору повітря	Необхідна для дослідження складу атмосферного повітря
Лічильник газовий G6	Вимірювання об'єму газів	Висока точність вимірювань	Застосовується для моніторингу споживання газу
Електроаспіратор М-822	Примусовий відбір повітря для аналізу	Може працювати у складних погодних умовах	Використовується у системах моніторингу
Ротаметр	Вимірювання швидкості потоку газів	Має просту конструкцію і високу надійність	Застосовується у промисловості та лабораторних дослідженнях

Виходячи з інформації про список приладів, які застосовуються на постах спостереження, є потреба розуміти їх технічні характеристики.

Секундомір – використовується в наукових дослідженнях та промислових процесах, де необхідно точно фіксувати часові інтервали.

Технічні характеристики:

Тип: Механічний або електронний.

Точність: До 0,01 секунди.

Діапазон вимірювання: Від 0 до 60 хвилин.

Робоча температура: Від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Барометр – прилад для вимірювання атмосферного тиску. Він використовується в метеорології для прогнозування погоди та в наукових дослідженнях, пов'язаних з атмосферними явищами.

Технічні характеристики:

Тип: Анероїдний або ртутний.

Діапазон вимірювання: Від 800 до 1060 гПа.

Точність: $\pm 0,5$ гПа.

Робоча температура: Від -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Анемометр МС-13 – це прилад для вимірювання швидкості вітру. Він широко використовується в метеорології, авіації та будівництві для оцінки вітрових навантажень.

Технічні характеристики:

Тип: Чашковий механічний.

Діапазон вимірювання швидкості вітру: Від 1 до 30 м/с.

Точність: $\pm 0,5$ м/с.

Робоча температура: Від -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Установка аспіраційна УАС-100 призначена для відбору проб пилу та аерозолів у повітрі. Вона використовується в моніторингу та промисловій гігієні для контролю якості повітря.

Технічні характеристики:

Продуктивність: 100 м³/год.

Фільтруючий елемент: Багатоступеневий фільтр.

Рівень шуму: До 65 дБ.

Енергоспоживання: 1,5 кВт.

Лічильник газовий G6 використовується для вимірювання об'єму спожитого газу в побутових та комерційних умовах.

Технічні характеристики:

Пропускна здатність: До 6 м³/год.

Робочий тиск: До 0,5 бар.

Температурний діапазон: Від -20°C до +50°C.

Матеріал корпусу: Алюмінієвий сплав.

Електроаспіратор М-822 призначений для відбору проб газів та аерозолів з атмосфери. Він застосовується в моніторингу та промисловій гігієні для аналізу забруднення повітря.

Технічні характеристики:

Продуктивність: До 50 л/хв.

Живлення: 220 В, 50 Гц.

Споживана потужність: 100 Вт.

Рівень шуму: Не більше 60 дБ.

Ротаметр – прилад для вимірювання витрати рідини або газу в трубопроводі.

Технічні характеристики:

Продуктивність: Від 0,1 до 100 л/хв

Живлення: Не потребує зовнішнього живлення

Споживана потужність: Відсутня

Рівень шуму: 0 дБ

Матеріал виготовлення: Скло, пластик або метал

Температурний діапазон роботи: Від -40°C до +120°C

Діапазон робочого тиску: Від 0,1 до 10 бар.

Для розв'язання нагальних екологічних проблем міста та забезпечення збалансованого розвитку соціальних, екологічних та економічних аспектів необхідна працююча система постійних спостережень за атмосферним повітрям [89].

Основною метою цієї системи моніторингу є контроль екологічних показників, зокрема рівня забруднення атмосфери, та інформування населення про якість повітря. Крім того, система дозволяє приймати оперативні рішення в екологічних кризових ситуаціях та повідомляти громадськість про ймовірний негативний вплив стану довкілля на різні соціальні групи населення [90].

Пости моніторингу повітря повинні збирати дані про стан повітря залежно від метеорологічних умов, таких як стан стабільності атмосфери, швидкість та напрямок вітру. Інформація, що надходить від таких станцій моніторингу повітря, має бути повною і максимально точно відображати стан навколишнього середовища у місці розташування постів. Звітування про стан повітря має бути доступним та зрозумілим для широкої аудиторії, щоб люди могли бути поінформовані про якість повітря та її вплив на здоров'я людей та навколишнє середовище [85].

Для забезпечення оптимальної оцінки впливу джерел викидів на населення, необхідно правильно встановити станцію моніторингу. Вона повинна бути розташована таким чином, щоб забезпечити точне вимірювання інтенсивності забруднення повітря та його впливу на навколишнє середовище та здоров'я людей. Також важливо враховувати географічні та метеорологічні умови для отримання надійних та об'єктивних даних [88].

Розташування постів моніторингу повітря залежить від типу самого поста, який може бути стаціонарним, пересувним, для стаціонарних джерел, транспортним або загального типу. Підбір місця розташування пости моніторингу повітря допоможе забезпечити оптимальну оцінку інтенсивності впливу на населення джерел викидів [88].

Пересувні пости моніторингу атмосферного повітря мають за мету перевірити та вдосконалити теоретичні прогнозування щодо місць розташування станцій моніторингу. Успішний вибір місць установки станцій моніторингу ґрунтується на результаті практичної перевірки, проведеної пересувними постами теоретичної моделі розрахунку місць та установки станцій постійного моніторингу [90].

Для збільшення ефективності заходів, інформація повинна бути повною. Повнота інформації регламентується числом контрольованих параметрів, термінами моніторингу, розміщенням постів спостережень. Достовірність інформації є теж важливим компонентом ефективності і це досягається дотриманням вимог, що визначені нормативами та забезпечують одержання достовірних даних, однорідність інформації, доцільність обробки та санітарно-гігієнічної оцінки за даними спостережень забруднення повітря, правильність пояснення причин збільшених рівнів забруднення та виявлення тенденцій зміни меж забруднення та розсіювання домішок, режиму викидів в даному районі [91].

2.2. Розроблення вимог до розміщення та кількості постів спостережень в агломераціях

Розміщення та кількість постів спостережень в агломераціях є актуальним питанням, яке вимагає ретельного вивчення та розробки відповідних вимог.

Існує програма підготовки регіональних та загальнодержавної програм моніторингу довкілля, яка є методичними рекомендаціями до створення системи моніторингу. В програмі зазначаються вимоги та правила до систем моніторингу та спостережень за довкіллям, що мають розроблятися під час планування та створення системи моніторингу [92].

В Договорі про заснування Європейської Спільноти, а саме стаття 175 описані рекомендації введення заходів про планування [14], завдяки якій

створено Директиву 2008/50/ЄС Європейського парламенту та ради, про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи який є обов'язковим до використання та є досвідом європейської системи моніторингу за атмосферним повітрям урбанізованих територій. Цей документ встановлює вимоги до розміщення постів спостереження та відбору проб з метою захисту здоров'я людини [15].

Правила організації спостережень за забрудненням атмосфери в містах та населених пунктах регулюються вимогами ДСТУ 17.2.3.01–04 «Охорона природи. Атмосфера. Правила контролю якості повітря населених пунктів» [95].

Однією з основних задач організації міської системи моніторингу є визначення точок для розміщення станцій спостереження. Кількість станцій та їхнє розташування залежать від чисельності населення, площі населеного пункту, особливостей рельєфу, рівня промислового розвитку, транспортної інфраструктури, а також наявності зон відпочинку [96].

Переваги постів спостережень у містах та агломераціях є очевидними. Вони дозволяють виявляти потенційні загрози, попереджати злочини, швидко реагувати на випадки надзвичайних ситуацій та забезпечувати контроль над громадським порядком [97].

Мінімальна кількість пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях, де фіксовані вимірювання вмісту забруднюючих речовин є єдиним джерелом інформації для оцінювання якості атмосферного повітря (рис. 2.2).

Населення агломерації чи зони (тисяч чоловік)	Якщо максимальні концентрації перевищують верхній поріг оцінювання				Якщо рівень максимальних концентрацій знаходиться між верхнім та нижнім порогами оцінювання				Мінімальна кількість пунктів спостережень для фіксованого вимірювання концентрацій озону		
	забруднювальна речовина, за винятком ТЧ	ТЧ (ТЧ ₁₀ + ТЧ _{2,5})	As, Cd, Ni	бенз(а) пірен	забруднювальна речовина, за винятком ТЧ	ТЧ (ТЧ ₁₀ + ТЧ _{2,5})	As, Cd, Ni	бенз(а) пірен	агломерації (міські та приміські)	інші зони (приміські та сільські)	сільські околиці
0-249	1	2	1	1	1	1	1	1		1	1 пункт на 50000 км ² як середня щільність по всіх зонах та 1 пункт на 25000 км ² для умов складного рельєфу
250-499	2	3			1	2			1	2	
500-749	2	3			1	2			2	2	
750-999	3	4	2	2	1	2	1	1	2	2	
1000-1499	4	6			2	3			3	3	
1500-1999	5	7			2	3			3	4	
2000-2749	6	8	2	3	3	4	1	1	4	5	
2750-3749	7	10			3	4			5	6	
3750-4749	8	11	3	4	3	6	2	2	один додатковий пункт на 2 млн мешканців	один додатковий пункт на 2 млн мешканців	
4750-5999	9	13	4	5	4	6	2	2			
>6000	10	15	5	5	4	7	2	2			

Рисунок 2.2 – Порядок розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях

2.3. Теоретичні основи побудови інформаційно-аналітичних систем в моніторингу атмосферного повітря на територіях промислових комплексів і агломерацій

Для забезпечення ефективного моніторингу та аналізу отриманих даних, необхідно використовувати інформаційно-аналітичні системи. Вони поєднують в собі сучасні методи та інструменти обробки, зберігання, аналізу та візуалізації даних. Вони дозволяють здійснювати комплексний аналіз стану

атмосферного повітря, виявляти забруднюючі речовини та їх джерела, а також прогнозувати подальші зміни.

Побудова інформаційно-аналітичних систем в моніторингу атмосферного повітря вимагає інтеграції різних технологій та методів для забезпечення точності, ефективності та доступності отриманої інформації. Використання таких систем допомагає зробити моніторинг більш об'єктивним [97].

У діючих інформаційно-аналітичних системах в моніторингу атмосферного повітря є певні недоліки, а саме:

- більшість інформації відображається у цифровому форматі, не враховуючи рівень знань користувачів;
- головним чином використовуються статичні картографічні ресурси;
- відсутність різних рівнів доступу до бази даних;
- відсутність можливості надати зворотній зв'язок;
- фокусування на виконанні завдань державних органів влади відповідно до законодавства про державний моніторинг, без врахування інтересів звичайних громадян;
- відсутність алгоритмів для попередження користувачів та громадян про можливі стрімкі зміни рівнів забруднення;
- відсутність алгоритмів для прийому й переадресації запитів і звернень від зареєстрованих користувачів, наприклад, до місцевої урядової «гарячої лінії» [98].

Збір даних про якість повітря в інформаційно-аналітичній системі вимагає використання різноманітних засобів та технологій. Деякі з них включають:

- Автоматичні метеорологічні пости. Ці пости мають датчики для вимірювання параметрів атмосфери, таких як температура, вологість, атмосферний тиск та швидкість вітру. Ці дані є важливими для розуміння

кліматичних умов та метеорологічних факторів, які впливають на якість повітря.

- Датчики забруднення повітря. Ці датчики призначені для вимірювання рівнів різних забруднюючих речовин в повітрі, таких як оксиди азоту, оксиди сірки, вуглеводні, тверді частинки (PM2.5 та PM10) та інші шкідливі речовини. Вони можуть бути розташовані на стаціонарних пунктах спостереження, які розміщені в різних районах для забезпечення широкого покриття.

- Супутникові спостереження. Супутникові системи зі знімальними пристроями надають можливість отримувати зображення Землі з космосу. Ці зображення можуть бути використані для визначення розподілу забруднюючих речовин та інших параметрів атмосфери на великих територіях. Супутникові дані можуть бути поєднані з даними зі стаціонарних станцій та датчиків забруднення повітря для отримання комплексної картини якості повітря.

- Мобільні додатки та сенсори. Розвиток технологій мобільних пристроїв дав можливість використовувати мобільні додатки та сенсори для збору даних про якість повітря. Це можуть бути смартфони, що використовують вбудовані сенсори, такі як газові датчики, геолокація та інші, для вимірювання концентрацій забруднюючих речовин. Мобільні додатки також можуть залучати користувачів до збору даних та надавати їм можливість спільно внести свій внесок у моніторинг якості повітря.

- Мережа сенсорів Інтернету речей (IoT). Це мережа підключених пристроїв, які можуть вимірювати та передавати дані про якість повітря у режимі реального часу. Ці сенсори можуть бути розташовані в різних місцях, включаючи вулиці, будівлі, транспортні засоби тощо. Вони забезпечують постійний моніторинг індикаторів якості повітря та надають дані для аналізу.

- Збір даних про якість повітря через ці засоби дозволяє отримувати якісну та кількісну інформацію про забруднюючі речовини, їх концентрацію та розподіл в атмосфері. Використання цих даних у системі моніторингу

дозволяє розпізнавати тренди, виявляти джерела забруднення та приймати обґрунтовані рішення для покращення якості повітря та охорони навколишнього середовища [99].

Обробка отриманих даних про якість повітря є важливим етапом в побудові інформаційно-аналітичних систем в моніторингу атмосферного повітря. Під час обробки дані піддаються різноманітним методам, що включають: видалення шуму, калібрування, інтерполяція, статистичний аналіз, нормалізація та стандартизація, моделювання та прогнозування, візуалізація.

Аналіз даних дозволяє виявити головні джерела забруднення, розпізнати тренди та прогнозувати зміни в якості повітря. Завдяки аналізу даних можна виявити взаємозв'язки між різними факторами, такими як промисловість, транспорт, побутові викиди та інші джерела забруднення. Це допомагає управлінцям і приймачам рішень приймати обґрунтовані рішення для покращення якості повітря та зменшення негативного впливу на довкілля [100].

Візуалізація результатів є важливим етапом в інформаційно-аналітичних системах моніторингу атмосферного повітря. Вона допомагає зрозуміти складну інформацію та зв'язки між різними показниками якості повітря, а також передає дані в зрозумілій та доступній формі для користувачів.

Моделювання та прогнозування в інформаційно-аналітичних системах є важливим інструментом для розуміння та передбачення змін в якості повітря. Для цього використовуються різні підходи та методи.

Прогнозування на основі моделей дозволяє отримати інформацію про майбутні тенденції та варіації в якості повітря [99].

Точність прогнозів залежить від якості вхідних даних, а також від правильного моделювання та врахування всіх факторів, що впливають на якість повітря. Постійне оновлення та вдосконалення моделей на основі нових даних допомагає забезпечити більш точні та достовірні прогнози.

Згідно з принципами Конвенції, кожна держава-учасниця зобов'язується забезпечити доступ до інформації про стан довкілля, розповсюджувати таку інформацію та залучати громадськість до процесу прийняття рішень, що стосуються довкілля [101].

Узагальнюючи теоретичні та методологічні засади моніторингу атмосферного повітря з використанням геоінформаційних систем, доцільно виділити типовий алгоритм просторової оцінки ефективності та рівня забруднення територій. Алгоритм дозволяє на основі багатоваріантної ГІС-структури здійснювати інтегральну просторову оцінку стану атмосферного повітря та ефективності розміщення мережі моніторингу. Відмінність запропонованого підходу полягає у поєднанні картографічної алгебри, нормалізованих індексів КІЗА та врахування демографічних чинників, що забезпечує комплексність і гнучкість прийняття управлінських рішень.

2.4. Аналіз стану забруднення атмосферного повітря в умовах муніципальних промислових комплексів та агломерацій

Муніципальні промислові комплекси та агломерації є центрами промислового виробництва, де зосереджено значну кількість виробничих потужностей та інфраструктури. Вони грають важливу роль у розвитку економіки та забезпеченні потреб населення, проте, внаслідок інтенсивної діяльності таких комплексів, в атмосферу викидаються значні обсяги екологічно небезпечних речовин, таких як сірковуглець, оксиди азоту, тверді частки та інші [95, 102].

При вирішенні проблеми забруднення атмосферного повітря важливо враховувати також соціально-економічні аспекти. Застосування екологічних технологій та відновлювальних джерел енергії може стимулювати створення нових робочих місць та сприяти розвитку екологічно-орієнтованих галузей [103 - 105].

Так, застосування екологічних технологій та відновлювальних джерел енергії може мати значний вплив на економіку та створення нових робочих місць.

Подолання проблеми забруднення атмосфери вимагає комплексного підходу та довгострокових зусиль. Це важлива задача, яка потребує спільних зусиль всіх зацікавлених сторін [106-108].

Проаналізовано стан повітря в агломерації Дніпро (рис. 2.3) задля ефективного аналізу та розуміння стану повітря. А також виділені конкретні агломерації Дніпропетровської області, як локальні зони розгортання удосконаленої системи моніторингу.

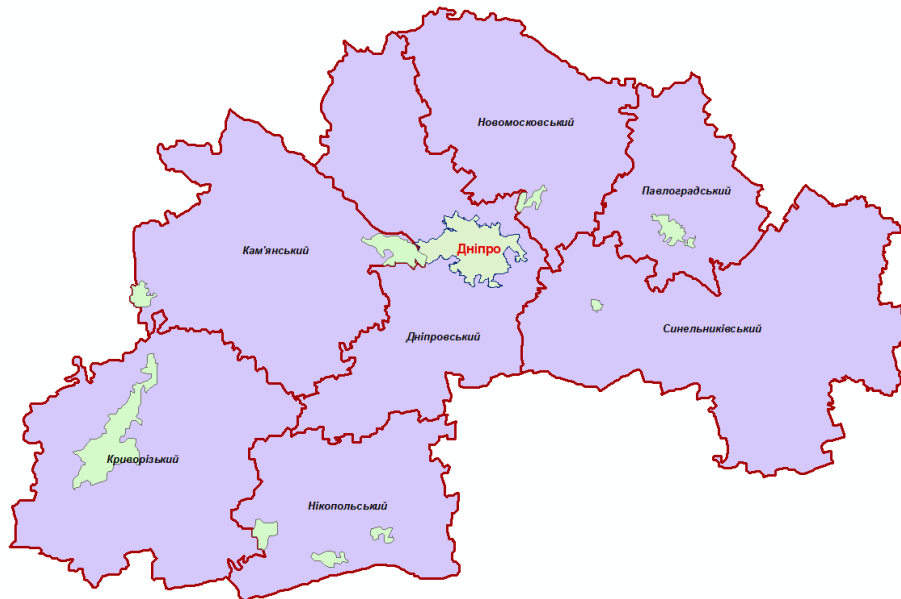


Рисунок 2.3 – Агломерації Дніпропетровської області

Агломерація Дніпро розташована в межах степової зони України, на стику Дніпровсько–Орільського та Сурсько-Дніпровського фізико-географічних районів, що зумовлює складну рельєфну структуру території. Центральною водною артерією є річка Дніпро, яка поділяє територію на лівобережну та правобережну частини. Лівобережжя займає частину Придніпровської низовини з рівнинним заплавленим рельєфом (висоти 51-73 м); у прибережній зоні та індустриальних районах поширені піщані дюни.

Суттєвий вплив на гідросистему має річка Самара. В Амурському Нижньодніпровському районі збереглися озера – залишки русла Протовчі. Серед приток – Гнилокиш, Кримка, Шиянка (формує Ігреньський острів). На Дніпрі в межах міста є острови: Монастирський, Швецький, Свинячий, Пороховий, Кодачок. Правобережжя належить до Придніпровської височини, рельєф розчленований балками й ярами (до 0,9 км/км²), перепад висот сягає 180 м. Основні балки: Тонельна, Красноповстанська, Запорізька, Аптекарска, Сухий яр, Діївська; на заході – плавні з протокою Старий Дніпро. Ґрунти: на правобережжі – чорноземи малогумусні, на лівобережжі – лучно-чорноземні, болотні, частково засолені. У цілому покрив середньої родючості, придатний для озеленення. Клімат помірно континентальний: спекотне літо, м'яка зима. Середні температури: липня +26,7 °С, січня –5,5 °С (мінімум –8,4 °С). Вітри переважно помірні, сильні (9-10 м/с) трапляються в 5 % випадків. Стійкий сніговий покрив утворюється 25 грудня, сходить 3 березня.

Кліматичні показники м. Дніпро за 2024 рік – важливий фактор для практичної реалізації системи моніторингу повітря. Цей фактор включений у технологію розгортання на локальному рівні, але також стосується й регіонального (табл. 2.15–2.19)

Таблиця 2.15 – Середньомісячна та річна температура повітря (°С)

Січ	Лют	Бер	Кві	Тра	Чер	Лип	Сер	Вер	Жов	Лис	Гру	Рік
–3.4	–2.4	2.7	10.3	16.9	21.0	23.0	23.0	16.8	9.7	3.7	–0.6	10.1

Таблиця 2.16 – Середня кількість опадів (мм) за місяць та за рік

Січ	Лют	Бер	Кві	Тра	Чер	Лип	Сер	Вер	Жов	Лис	Гру	Рік
45	35	47	47	53	59	48	40	50	39	41	43	547

Таблиця 2.17 – Середня відносна вологість повітря (%)

Січ	Лют	Бер	Кві	Тра	Чер	Лип	Сер	Вер	Жов	Лис	Гру	Рік
85	81	75	66	60	59	59	54	62	72	82	83	70

Середня кількість днів з туманами на рік: 30-40.

Таблиця 2.18 – Повторюваність напрямку вітру (%) та штилів

Пн	ПнС	С	ПдС	Пд	ПдЗ	З	ПнЗ	Штиль
12	8	10	9	11	10	15	10	15

Таблиця 2.19 – Середня швидкість вітру (м/с) по місяцях та за рік

Січ	Лют	Бер	Кві	Тра	Чер	Лип	Сер	Вер	Жов	Лис	Гру	Рік
4.8	5.1	5.0	4.5	4.0	3.8	3.7	3.8	4.2	4.4	4.6	4.7	4.4

2.5. Експертне оцінювання поточної та оперативної інформації про стан забруднення атмосферного повітря в умовах муніципальних промислових комплексів та агломерацій

Оцінювання поточної та оперативної інформації про стан забруднення атмосферного повітря в умовах муніципальних промислових комплексів та агломерацій є важливим етапом в здійсненні ефективного контролю за викидами забруднюючих речовин у повітря та прийнятті необхідних заходів для запобігання подальшому забрудненню. Експертне оцінювання дозволяє зібрати, аналізувати та оцінити інформацію щодо рівня забруднення, виявити основні джерела викидів та їх вплив на довкілля [109].

Поточна і оперативна інформація про стан забруднення атмосферного повітря включає в себе дані про концентрацію різних забруднюючих речовин у повітрі, зміни цих показників протягом певного періоду, відстеження трендів та прогнозування можливих ризиків. Для забезпечення точності та достовірності отриманої інформації використовуються різні методи моніторингу та наукові підходи. Зокрема, використовуються автоматизовані системи моніторингу, що здатні вимірювати концентрацію різних забруднюючих речовин у режимі реального часу. Такі системи забезпечують постійний контроль за якістю повітря і надають оперативну інформацію про будь-які відхилення від допустимих нормативів [110].

Крім того, проводяться комплексні аналізи зразків повітря, що дозволяють визначити не лише концентрацію окремих речовин, а й їх взаємодію та вплив на навколишнє середовище. Це допомагає зрозуміти загальний стан атмосферного повітря та оцінити наслідки забруднення для здоров'я людей та екосистем [111].

Експертне оцінювання поточної та оперативної інформації вимагає залучення фахівців з різних областей, які аналізують отримані дані, порівнюють їх з нормативами та критеріями безпеки, і роблять висновки про стан забруднення атмосфери та необхідність вжиття заходів для його зменшення [112-114].

Дослідники також оцінюють кількість викидів забруднюючих речовин у повітря та їх вплив на якість повітря в межах промислової зони та довкілля. Це включає оцінку обсягу викидів, розподілу забруднюючих речовин у просторі та часі, а також оцінку можливого впливу на здоров'я людей, екосистем та клімат [115-118].

Ефективна система моніторингу та звітності допомагає усунути можливі проблеми, пов'язані зі забрудненням повітря, вчасно виявляти порушення нормативів та приймати необхідні заходи для зменшення забруднення та покращення якості повітря в умовах муніципальних промислових комплексів та агломерацій [119, 120].

Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я людей та довкілля є серйозною проблемою, яку необхідно враховувати в рамках експертного оцінювання. Оцінка наслідків забруднення включає аналіз епідеміологічних даних та наукових досліджень, спрямованих на визначення впливу шкідливих речовин на здоров'я людей [121].

Епідеміологічні дослідження дають змогу встановити зв'язок між рівнем забруднення повітря та захворюваннями дихальної системи, серцево-судинної системи та іншими захворюваннями. Це може допомогти оцінити ризики для різних груп населення [122].

Дослідження впливу шкідливих речовин на органи та системи організму людини розкривають механізми пошкодження і прогресування хвороб. Вони допомагають встановити довідкові рівні експозиції та розробити рекомендації щодо безпечних рівнів забруднення повітря [123].

Окрім того, забруднення повітря має також негативний вплив на природні екосистеми. Рослинний світ може страждати від високих концентрацій шкідливих речовин, що призводить до погіршення росту, відмирання рослин та порушення екологічного балансу. Водні екосистеми та ґрунти також можуть зазнавати негативного впливу, який може мати подальші наслідки для всього довкілля [124].

2.6. Удосконалення методологічних підходів до оцінки та прогнозування змін стану довкілля, шкоди та збитків внаслідок воєнних дій

Забруднення навеолишнього середовища має складну багатofакторну природу. Джерела забруднення класифікуються на стаціонарні й пересувні, серед яких виділяють точкові, лінійні та площинні. Вони також можуть бути організованими або неорганізованими [125].

З початку повномасштабної війни в Україні у 2022 році кількість і типи джерел забруднення суттєво зросли. За даними Всесвітнього фонду охорони природи, понад 20 % природоохоронних територій України зазнали ушкоджень, а близько 2,9 млн га Смарагдової мережі перебувають у зоні ризику. Внаслідок бойових дій у повітря потрапило понад 38 тис. тонн викидів, а понад 352 тис. тонн утворених відходів забруднюють ґрунти [126].

Особливої уваги потребують нові джерела забруднення: вибухи ракет і БПЛА, пожежі, горіння військової техніки. Вони є неорганізованими, нестаціонарними та важко прогнозованими [127, 128].

На рис. 2.4 зображено типологію джерел викидів, зумовлених бойовими діями. Табл. 2.20 містить їхню класифікацію за характеристиками – від

моменту запуску до утилізації, яка є єдиним стаціонарним та організованим етапом цього процесу [129].

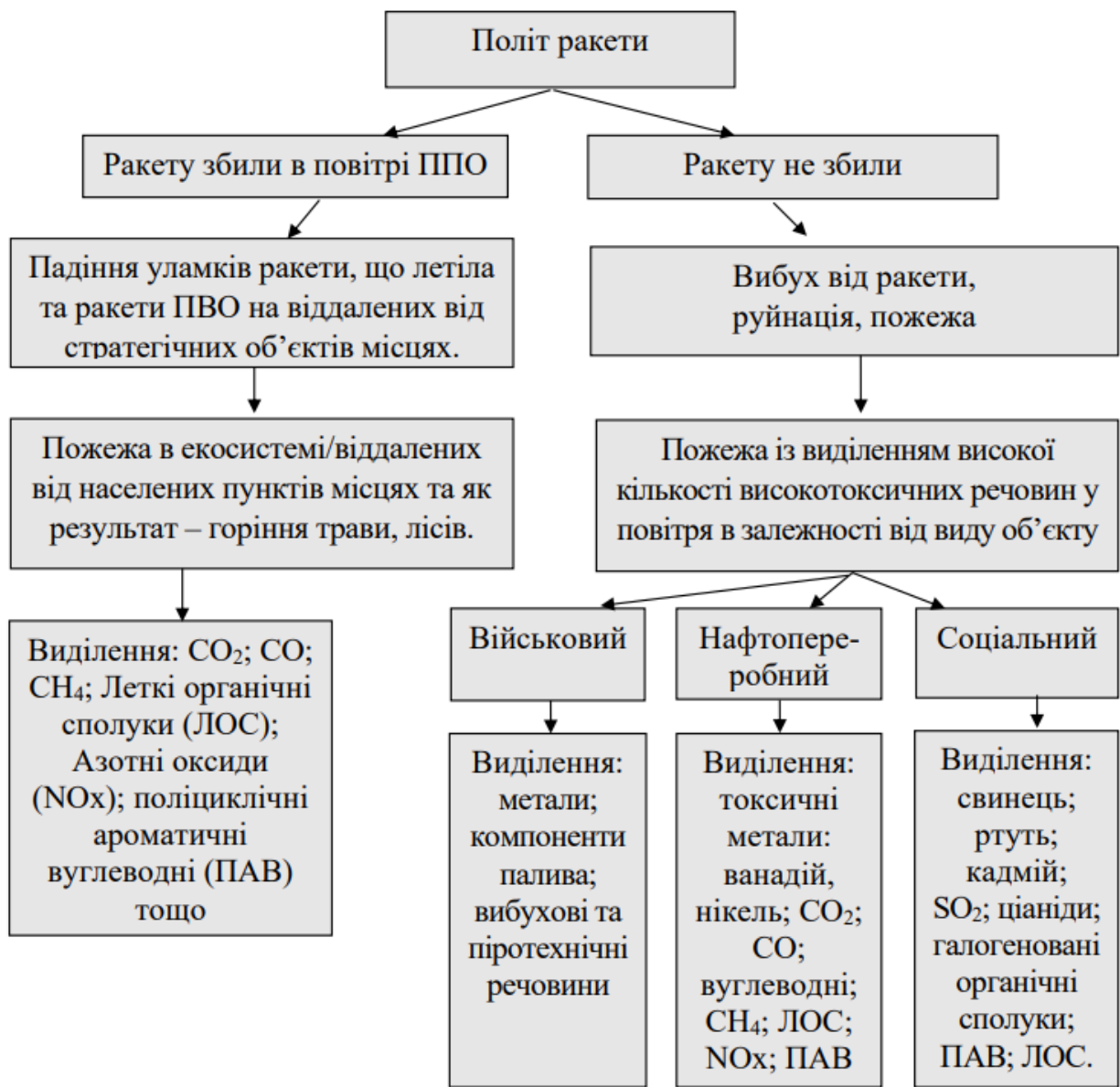


Рисунок 2.4 – Алгоритм сценарію подій під час польоту ракети

Такі хімічні речовини, як гептил та нітрозодиметиламін – компоненти ракетного палива – мають високий рівень токсичності, включаючи канцерогенний та нейротоксичний вплив. Вони небезпечні не лише при вдиханні, але й при контакті зі шкірою або слизовими оболонками.

Таблиця 2.20 – Класифікація джерел забруднення атмосферного повітря від воєнних дій

Джерело забруднення	Характеристики джерел забруднення							
	Точкові	Лінійні	Площинні	Організовані	Неорганізовані	Нестационарні	Стационарні	Квасистационарні
Запуск ракети	+	-	-	-	+	+	-	-
Політ ракети	-	+	-	-	+	+	-	-
Вибух ракети/БПЛА у повітрі	+	-	-	-	+	+	-	-
Вибух ракети/БПЛА на поверхні	+	-	-	-	+	+	-	-
Виникнення пожежі	-	-	+	-	+	+	-	-
Утилізація речовин/устаткування	+	-	+	+	-	-	+	+

У табл. 2.21–2.23 наведено перелік шкідливих речовин, які утворюються під час вибухів, із зазначенням їхніх характеристик, токсичності та потенційного впливу на здоров'я.

Таблиця 2.21 – Забруднюючі речовини, що надходять під час воєнних дій

Метали									
Залізо (Fe)	Алюміній (Al)	Мідь (Cu)	Хром (Cr)	Вольфрам (W)	Уран (U)	Свинець (Pb)	Бери- лій (Be)	Цинк (Zn)	Ртуть (Hg)
Компоненти палива									
нітроцелюлоза		нітрогліцерин		динітротолуол		нітрокванідин		перхлорат амонію	
Вибухові речовини									
тринітротолуол		гексо ген	октоген	етранітрат пентаеритриту		динітроанізол		нітротриа- золон	
Інші піротехнічні складові									
гексахлоретан			антрацен		білий фосфор		червоний фосфор		

Зважаючи на масштаб та інтенсивність бойових дій, традиційні стаціонарні пости спостереження є недостатньо ефективними для оперативного моніторингу повітря. Потрібно запроваджувати мобільні аналітичні системи та геопросторові методи аналізу з використанням ГІС, супутникових даних, а також динамічних моделей забруднення.

Таблиця 2.22 – Референтні концентрації за хронічного інгалаційного впливу

Речовина	RfC, мг/м ³	Джерело	Критичні органи/системи
Алюміній та сполуки	0,005	NCEA	ЦНС, органи дихання
Берилій та сполуки	0,00002	IRIS	Органи дихання, імунна система.
Мідь та сполуки	0,00002	CalEPA	Органи дихання, імунна система
Ртуть та сполуки	0,003	IRIS	ЦНС
Свинець та його неорганічні сполуки	0,00015	CalEPA	ЦНС, розвиток, кров
Фосфор	0,00007	CalEPA	Репродуктивна система, волосся
Хром (III)			Органи дихання
Хром (VI)	0,0001	IRIS	Органи дихання
Цинк та сполуки	0,0009	CalEPA	Органи дихання

Огляд ключових характеристик кожної з речовин зображено в табл. 2.23, це допоможе краще зрозуміти їхні особливості та потенційні ризики.

Таблиця 2.23 – Порівняльна характеристика вибухових речовин

Назва компоненту	Формула	Де використовується	Клас детонації	ТНТ еквівалент	Рівень токсичності
Тринітратолуол (ТНТ)	$C_7H_5N_3O_6$	Військові та промислові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1 (базова одиниця)	Висока, канцероген
Гексоген (RDX)	$C_3H_6N_6O_6$	Військові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1.6	Висока, нейротоксин
Октоген (HMX)	$C_4H_8N_8O_8$	Військові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1.7	Висока, токсична
Етранітрат пентаеритриту (ПЕН)	$C_5H_8N_4O_{12}$	Військові та промислові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1.66	Висока, токсична
Динітроанізол (DNAN)	$C_7H_6N_2O_5$	Компонент вибухових сумішей	Клас 1.1D	~0.8	Помірна
Нітротриазолон (NTO)	$C_2H_2N_4O_3$	Військові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1.1	Низька

ТНТ еквівалент (TNT еквівалент) – це показник, який використовується для порівняння вибухової потужності різних вибухових речовин з тротилом

(TNT), який вважається стандартом. Вибухова потужність вимірюється в мегаджоулях на кілограм вибухової речовини (МДж/кг) або кілокалоріях на кілограм (ккал/кг) [130]. Тобто, потужність в 1.0 ТНТ еквівалент – це потужність, яка еквівалентна вибуховій потужності 1 кг тротилу [131].

Висновки до розділу 2

Удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій залишається актуальним і стратегічно важливим завданням, з огляду на зростаючу інтенсивність промислової діяльності та її вплив на довкілля і здоров'я населення. Ключовим у цьому процесі є впровадження науково-обґрунтованих підходів, які спрямовані не лише на виявлення проблем, а насамперед – на підвищення оперативності, достовірності та ефективності моніторингу.

Покращення методології та технічного забезпечення системи моніторингу дозволить забезпечити отримання своєчасних і точних даних, які стануть основою для формування обґрунтованих управлінських рішень та ефективного регулювання промислових викидів. Це, у свою чергу, сприятиме поліпшенню якості повітря та покращення умов проживання населення.

Особливу увагу слід приділяти впровадженню інноваційних технологій збору, обробки та аналізу даних, що підвищують адаптивність системи до нових викликів – зокрема, змін кліматичних умов та трансформацій промислових процесів. Системна інтеграція таких рішень дозволить формувати більш сталу модель екологічного управління на рівні агломерацій.

Успішне впровадження вдосконалень можливе лише за умов активної координації зусиль наукової спільноти, органів влади, промисловості та громадськості. Формування партнерських зв'язків у цій сфері є основою ефективного моніторингу та важливим елементом стратегії сталого розвитку.

Загальний успіх залежить від усвідомлення пріоритетності збереження чистого повітря як ключового ресурсу для життя та розвитку. Необхідне постійне вдосконалення законодавчої бази, впровадження інструментів контролю викидів та сучасних технологій очищення, що сприятимуть екологічній безпеці й раціональному використанню ресурсів.

Також, висновки підтверджують важливість удосконалення методологічних підходів до оцінки впливу бойових дій на довкілля. Створення моделей, що враховують фізико-хімічні властивості забруднюючих речовин, сценарії бойових подій та особливості території, має бути невід'ємною частиною системи забезпечення екологічної безпеки.

Результати досліджень відображені у публікаціях [99, 100, 103, 105, 106, 107, 124, 126, 131]

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СКЛАДОВИХ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ПРИКЛАДІ АГЛОМЕРАЦІЇ ДНІПРО

3.1. Обґрунтування вибору місць розташування постів спостережень та розгортання оновленої мережі моніторингу атмосферного повітря

Для визначення переліку місць розташування постів безперервного моніторингу виконано повний аналіз згідно з критеріями, що наведені у попередньому розділі, з урахуванням діючих постів спостереження Держпродспоживслужби, Державної гідрометслужби МНС, МОЗ та значень фонових концентрацій, попередній розрахунок розсіювання та додатково доповнено найбільш актуальними точками (місцями, районами) згідно з зверненнями та скаргами населення щодо забруднення повітря. Обґрунтування визначення орієнтовних зон розташування постів моніторингу забруднення атмосферного повітря в агломерації Дніпро виконано за допомогою ГІС «ДніпроМАП» в середовищі ArcGIS. Структура та складові шари ГІС «Дніпро.МАП» розроблені згідно з наступним переліком:

1. Аерофотознімок високої роздільної здатності, доповнений напівпрозорою растровою топографічною основою агломерації Дніпро, використовується для картографування та аналізу місцезнаходження об'єктів у різних шарах ГІС. Цей інструмент дозволяє вносити та коригувати дані, зокрема межі промислових підприємств, стаціонарні джерела атмосферного забруднення, перехрестя з інтенсивним рухом, джерела електропостачання (наприклад, школи), а також стаціонарні й маршрутні пости спостереження. Топографічна основа містить інформацію про назви вулиць, парків та інших важливих об'єктів міста, що сприяє точному орієнтуванню та аналізу (Додаток В1).

2. Промислові зони підприємств: інформація про межі та екологічний вплив. Включає контури промислових територій, дані про обсяги валових викидів пріоритетних забруднюючих речовин, класи небезпеки та розміри санітарно-захисних зон для 32 найбільших промислових підприємств міста Дніпра (Додаток В2).

3. Організовані джерела забруднення атмосфери: інформаційна база, що охоплює джерела викидів, розташовані на промислових територіях. Цей шар містить докладні технічні параметри кожного джерела, такі як висота конструкції, діаметр вихідного отвору, швидкість витоку газоповітряної суміші, температура, а також загальні обсяги викидів. У базі зареєстровано 95 активних джерел, кожне з яких має унікальну ідентифікацію: прив'язку до конкретного підприємства та наскрізний номер у ГІС для зручності аналізу та контролю. (Додаток В3).

4. Адміністративні райони міста: інформаційний шар, який містить межі районів з детальними даними про кількість та щільність населення станом на 1 січня 2021 року. Також включено інформацію про обсяги валових викидів організованих джерел забруднення повітря, розташованих у межах кожного району. Додатково вказано розрахункові обсяги викидів на одну особу та на 1 квадратний кілометр території. Ці показники щільності використовуються для планування і обґрунтування розміщення стаціонарних постів спостереження за станом довкілля (Додаток В4).

5. Рельєф місцевості: растровий напівпрозорий шар, який відображає абсолютні висоти місцевості, закодовані в кожному пікселі. Просторова роздільна здатність шару становить 1 піксель на 10 квадратних метрів. Вихідні дані були отримані з радарного супутника Sentinel-1. На основі цього шару, за допомогою інструментів ГІС, створено ізолінії висот з інтервалом у 10 метрів, що дозволяє детально вивчати рельєф території. Цей шар є ключовим для аналізу ландшафтних елементів, таких як улоговини, підвищення та пагорби, які суттєво впливають на динаміку розсіювання домішок в атмосфері (Додаток В5).

6. Перехрестя міста: моніторинг інтенсивності руху та впливу на навколишнє середовище. Цей точковий шар містить актуальну інформацію про інтенсивність транспортного руху на найбільш завантажених перехрестях міста. До параметрів входять кількість транспортних засобів за годину та добу, тип і особливості кожного перехрестя, а також характеристики прилеглої території, включаючи наявність житлової забудови, зелених зон та інфраструктури. Для кожного перехрестя розраховано комплексний індекс забруднення атмосфери, спричинений викидами автотранспорту. Для цього застосовано спеціальну методику, яка враховує інтенсивність руху, тип автотранспортних потоків і концентрацію шкідливих речовин у повітрі. Оскільки автотранспорт є одним із основних джерел забруднення повітря в міських умовах, особливу увагу приділено перехрестям, розташованим у районах з високою щільністю житлової забудови. Такі перехрестя потребують не лише моніторингу, але й впровадження заходів щодо зменшення впливу транспорту на довкілля, включаючи оптимізацію руху, збільшення зелених зон і встановлення очисних бар'єрів. (Додаток В6).

7. Санітарно-захисні зони промислових підприємств: призначення та правила використання. Цей шар містить межі СЗЗ, визначених для промислових підприємств міста. Контури зон були сформовані за допомогою інструментів ГІС на основі даних про промислові ділянки, зокрема нормативні розміри СЗЗ, визначені для кожного підприємства.

Це необхідно для зниження впливу небезпечних факторів на населення. За межами СЗЗ концентрація забруднюючих речовин, що викидаються підприємством, повинна відповідати гранично допустимим концентраціям (ГДК) [142]. Цей шар дозволяє не лише контролювати дотримання нормативів, але й планувати міський простір з урахуванням екологічної безпеки та забезпечення комфортних умов для мешканців (Додаток В7).

8. Зони формування максимальних приземних концентрацій забруднюючих речовин. Цей шар відображає межі зон, у яких спостерігаються максимальні приземні концентрації забруднюючих речовин за несприятливих

метеорологічних умов, а також за типової стратифікації атмосфери міста. Важливо зазначити, що інтенсивність викидів не визначає відстань до цих зон – ключову роль відіграють технологічні характеристики джерел (наприклад, висота труби, швидкість виходу суміші) та метеорологічні умови, включаючи напрямок і швидкість вітру, стратифікацію атмосфери. Для кожного джерела були розраховані відстані, на яких спостерігаються максимальні приземні концентрації забруднюючих речовин, окремо для нестійкої (небезпечної) та нейтральної (типової для міста) стратифікації. Розрахунки виконувались за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення ScreenView від компанії LakesEnvironmental, яке базується на сучасних методиках визначення приземних концентрацій від викидів стаціонарних джерел. Цей шар є важливим інструментом для аналізу розподілу забруднюючих речовин в атмосфері, планування екологічних заходів і прийняття рішень для забезпечення безпеки мешканців міста (Додаток В8) [133].

9. Електроживлення. Шар містить інформацію про школи, що можуть використовуватись для живлення стаціонарних постів спостереження за якістю повітря. Як і інші комунальні установи, школи зазвичай мають стабільне підключення до енергомережі, що робить їх зручними об'єктами для моніторингу. Часто вони розташовані в районах з високою щільністю населення, а також є місцями тривалого перебування дітей. Це підсилює актуальність встановлення постів у таких локаціях. Моніторинг повітря поблизу шкіл сприятиме своєчасному реагуванню на погіршення його якості та підвищенню рівня захисту здоров'я, зокрема дитячого населення (Додаток В9).

10. Стаціонарні пости моніторингу повітря. На карті вказано 6 діючих постів гідрометеослужби, а також потенційні місця для встановлення нових. Планується розміщення 20 автоматизованих газоаналізаторів. У разі неможливості встановлення стаціонарного поста передбачено маршрутні вимірювання – 2 маршрути по 16 точок. На кожній точці проба береться

близько 20 хвилин, що дозволяє завершити повний маршрут за одну 8-годинну зміну (Додатки В10–В11).

3.2. Обґрунтування інтеграції неорганізованих джерел забруднення в комплексну систему моніторингу повітря

У рамках експериментального дослідження проведено заміри концентрацій забруднюючих речовин, що виділяються в атмосферне повітря під час роботи генератора у міських умовах. Вимірювання здійснювались безпосередньо на відкритому просторі на проспекті Дмитра Яворницького у місті Дніпро в період аварійного відключення електроенергії, що могло виникнути внаслідок ворожого ракетного обстрілу або інших аварійних ситуацій (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Генератор на проспекті Дмитра Яворницького

Для дослідження використано генератор Alimar ALM–D–7500ME, що належить до портативних автономних електростанцій, придатних для міського використання. Це однофазний пристрій із номінальною потужністю 5,6 кВт і

максимальною – 6,0 кВт. Оснащений чотиритактним одноциліндровим двигуном моделі 192FAE (об'єм 498 см³, потужність 11,5 к.с.), генератор запускається електростартером, що зручно в будь-яких умовах. Споживання пального – близько 1,6 л/год, а об'єм бака 12 л забезпечує автономну роботу до 8 годин.

Під час роботи пристрій викидає низку забруднюючих речовин: оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO₂), оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO₂), а також тверді частинки PM_{2.5} і PM₁₀. Усі ці компоненти негативно впливають на довкілля, особливо в умовах міста. Також рівень шуму генератора досягає 84 дБ, що є додатковим екологічним фактором

Вимірювання проводилося лабораторними приладами, такими як: пиломір-аналізатор Walcom SR-516A (рис. 3.2.), газоаналізатор формальдегіду Tenmars TM-802 (рис. 3.3.), газоаналізатор оксиду вуглецю Tenmars TM-801 (рис. 3.4), газоаналізатор діоксиду вуглецю AZ-7755 (рис. 3.5), аналізатор якості повітря CEM DT-9881 (рис. 3.6).



Рисунок 3.2 – Пиломір-аналізатор Walcom SR-516A [135]



Рисунок 3.3 – Газоаналізатор формальдегіду Tenmars TM-802 [136]



Рисунок 3.4 – Газоаналізатор оксиду вуглецю Tenmars TM-801 [137]



Рисунок 3.5 – Газоаналізатор діоксиду вуглецю AZ-7755 [138]

3.4. Визначення фонових концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за межами міської агломерації

Для забезпечення об'єктивності результатів дослідження та подальшого порівняльного аналізу було здійснено вимірювання фонових концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за межами міської агломерації.

Маршрутом у напрямку селища Сурсько-Литовське було обрано три контрольні точки на різній відстані від міста Дніпро: перша точка – за 10 км від міської межі, друга – приблизно за 15 км, третя – орієнтовно за 20 км у бік села Зелений Гай. Обраний напрямок характеризується низьким рівнем індустріалізації, відсутністю значного транспортного навантаження та промислових об'єктів, що дозволяє фіксувати реальні фонові значення.

У кожній із точок було проведено серію вимірювань за сталої метеорологічної ситуації та в однаковий денний період. Для визначення концентрацій вуглецю оксиду (CO) використовувався газоаналізатор Tenmars TM-801 (рис. 3.4), для діоксиду вуглецю (CO₂) – прилад AZ-7755 (рис. 3.5), для формальдегіду (CH₂O) – Tenmars TM-802 (рис. 3.3). Для вимірювання рівня зважених частинок фракцій PM_{2.5} і PM₁₀ застосовувався пиломір-аналізатор Walcom SR-516A (рис. 3.2). Отримані результати стали основою для оцінки базового рівня забруднення атмосферного повітря регіону, що необхідно для адекватного порівняння з міськими концентраціями. Результати вимірювань наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати фонових вимірювань забруднюючих речовин у повітрі

Точка / Показник	Формальдегід (ppm)	Оксид вуглецю (CO, ppm)	Діоксид вуглецю (CO ₂ , ppm)	Пил (PM, ppm)
Точка 1 (10 км)	0,0	0,04	0,05	0,03
Точка 2 (15 км)	0,0	0,05	0,05	0,04–0,05
Точка 3 (20 км)	0,0	0,06	0,05	0,06–0,07

Крім виїзного фонових замірів за межами міста, частина вимірювань була також проведена в межах міської агломерації в умовно рекреаційних зонах – парках, лісосмугах та зонах малої забудови. Для цього застосовувався багатофункціональний аналізатор якості повітря СЕМ DT-9882 (рис. 3.6-3.7), отриманий у рамках міжнародного проєкту EMINReM (Erasmus+).



Рисунок 3.6 – Прилад СЕМ DT-9882



Рисунок 3.7 – Заміри концентрацій забруднюючих речовин приладом СЕМ DT-9882

Прилад дає змогу вимірювати широкий спектр параметрів, результати приведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. – Результати вимірювань приладом SEM DT-9882

Місце вимірювання	Формальдегід (НСНО), мг/м ³	Оксид вуглецю (СО), мг/м ³	PM2.5, мкг/м ³	PM10, мкг/м ³	TVOC, мг/м ³
Точка 1 – парк двір НТУ «Дніпровська політехніка»	0,026	0,84	18	34	0,25
Точка 2 – зелена зона парк ім. Т. Шевченка	0,031	1,12	24	41	0,37
Точка 3 – узбіччя просп. Д.Яворницького	0,045	2,65	46	75	0,82

3.5 Реалізація, апробація та інтеграція розробленої програми моніторингу в національні та міжнародні екологічні системи

Розроблена програма моніторингу атмосферного повітря, що поєднує мобільні сенсорні модулі, автономне живлення та цифрову обробку даних, є ефективним інструментом для екологічного контролю в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій. Її впровадження в агломерації Дніпро продемонструвало високу адаптивність до реалій війни, зокрема до відключень електроенергії, спричинених ракетними ударами по критичній інфраструктурі.

Для забезпечення безперервності збору даних система обладнана генератором, що дозволяє підтримувати роботу сенсорних приладів навіть за повної відсутності енергопостачання. Програмне забезпечення обробки даних забезпечує автоматичний запис результатів вимірювань, формування

щоденних звітів і передачу інформації до центральної бази даних за наявності стабільного мобільного або Wi-Fi-з'єднання. В межах експериментального етапу дослідження були отримані результати замірів, що вказують на перевищення за окремими забруднюючими речовинами, зокрема: оксидом вуглецю (CO), формальдегідом (CH₂O), а також твердими частинками PM_{2.5} та PM₁₀. Ці дані підкреслюють потребу інтеграції мобільних рішень у систему державного екологічного контролю.

З технічної точки зору, інтегрування розробленої програми до національної системи моніторингу можливе через відповідність формату даних вимогам, установленим наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України (рис. 3.8).

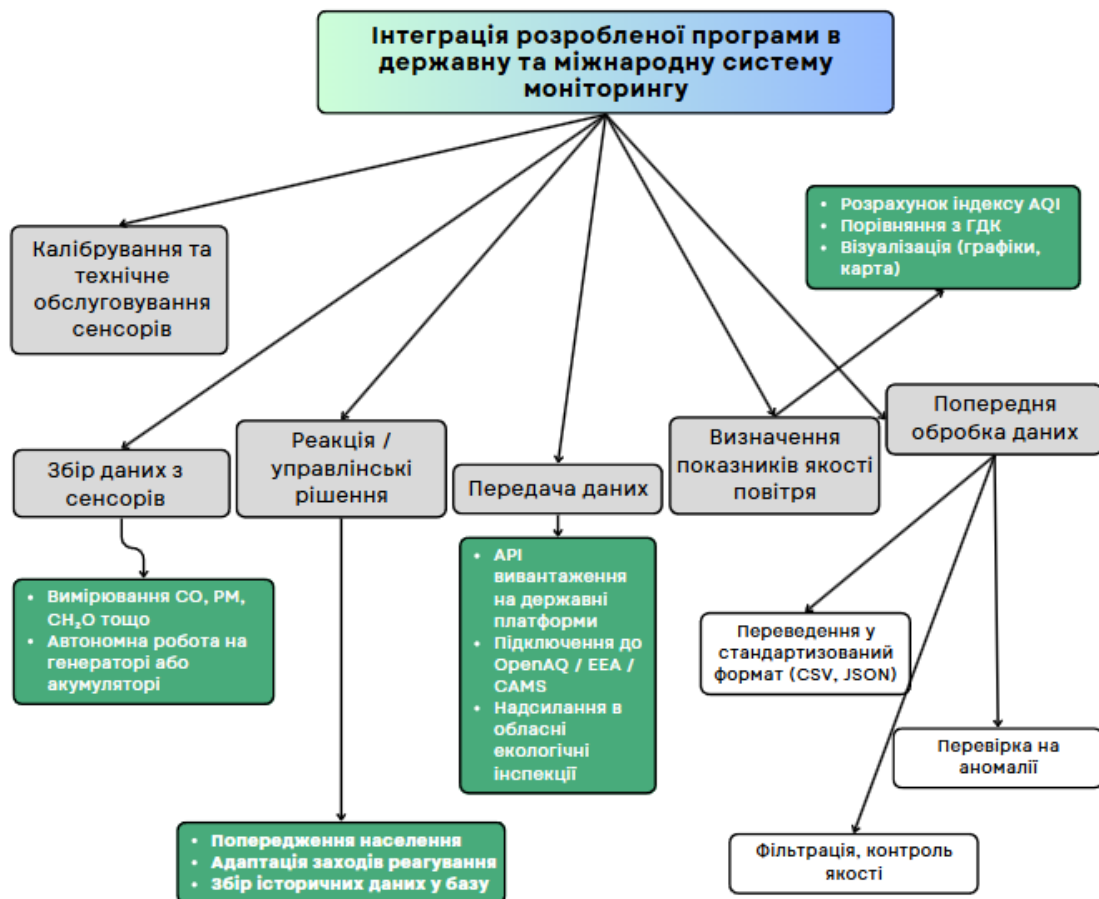


Рисунок 3.8 – Алгоритм інтеграції розробленої програми в державну та міжнародну системи моніторингу атмосферного повітря

Зокрема, відповідно до наказу №590 від 24 березня 2025 року, затверджено новий механізм оперативного інформування населення про якість повітря з використанням індексу якості повітря (AQI). Розроблена система підтримує формат збору та обробки даних, що відповідає параметрам цього індексу, включаючи основні забруднюючі речовини, їх концентрації та кольорово-текстові індикатори для громадського інформування [139, 140].

Для інтеграції у міжнародні екологічні платформи система забезпечує експорт даних у форматах CSV, JSON, XML та підтримує API для автоматичного оновлення баз, зокрема OpenAQ. Це дозволяє співпрацювати з ЕЕА, CAMS та іншими платформами, посилюючи позицію України у глобальних екологічних ініціативах та проєктах.

Таким чином, розроблена система демонструє інженерну ефективність, адаптивність до кризових умов та технічну готовність до інтегрування у національні й міжнародні системи моніторингу. Це відкриває перспективи її впровадження у ширшому масштабі – на рівні міст, регіонів або в рамках міжурядових екологічних програм.

3.6. Практична реалізація підсистеми оперативного інформування населення про небезпечні рівні забруднення атмосферного повітря

У зв'язку з необхідністю забезпечення своєчасного реагування населення на екологічні загрози, а також з метою підвищення рівня поінформованості громадян щодо стану атмосферного повітря, особливо у великих урбанізованих агломераціях, у межах даного дослідження передбачено створення підсистеми оперативного інформування населення.

Особливу увагу при розробленні даної підсистеми приділено положенням Наказу Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 24.03.2025 № 590, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 7 квітня 2025 року за № 536/43942. Цей нормативно-правовий акт встановлює Порядок інформування населення про якість повітря в Україні з

використанням індексу якості повітря (AQI), що базується на сучасних європейських практиках і рекомендаціях Всесвітньої організації охорони здоров'я [139].

У рамках дослідження проведено глибокий аналіз змісту та методології нового Порядку, що дозволило адаптувати розроблену систему до актуальних вимог законодавства. Зокрема, підсистема інформування населення реалізується через такі функціональні компоненти:

1. Автоматичне розрахування індексу якості повітря (AQI) на основі концентрацій основних забруднюючих речовин: ТЧ2.5, ТЧ10, озону (O_3), діоксиду азоту (NO_2), діоксиду сірки (SO_2).

2. Відображення індикаторів якості повітря у текстовому та кольоровому вигляді відповідно до шкали:

- «Добрий» (зелений);
- «Допустимий» (жовто–зелений);
- «Задовільний» (жовтий);
- «Незадовільний» (помаранчевий);
- «Поганий» (червоний);
- «Дуже поганий» (бордовий/фіолетовий).

3. Формування рекомендацій до дій для населення (обмеження перебування на вулиці, відміна фізичних навантажень, використання засобів індивідуального захисту тощо).

У якості практичного рішення щодо доступності екологічної інформації у міському просторі запропоновано використання вже наявної міської інфраструктури електронних табло на зупинках громадського транспорту, що наразі відображають графік прибуття транспорту. Враховуючи широке покриття, постійну видимість і доступність цих табло для мешканців різних районів міста, інтеграція даних про індекс якості повітря (AQI) у такі інформаційні системи створює додатковий канал екологічної комунікації. Це дає змогу значно розширити охоплення населення актуальною екологічною

інформацією в режимі реального часу та підвищити обізнаність про стан довкілля серед різних вікових і соціальних груп.

Крім того, розроблена система може підтримувати інші канали поширення даних, зокрема:

- telegram-боти, мобільні додатки, веб-платформи з інтерактивною картою забруднення;
- SMS-повідомлення для вразливих категорій населення;
- електронні листи з аналітичними звітами для органів місцевої влади та громадських організацій (рис. 3.9).

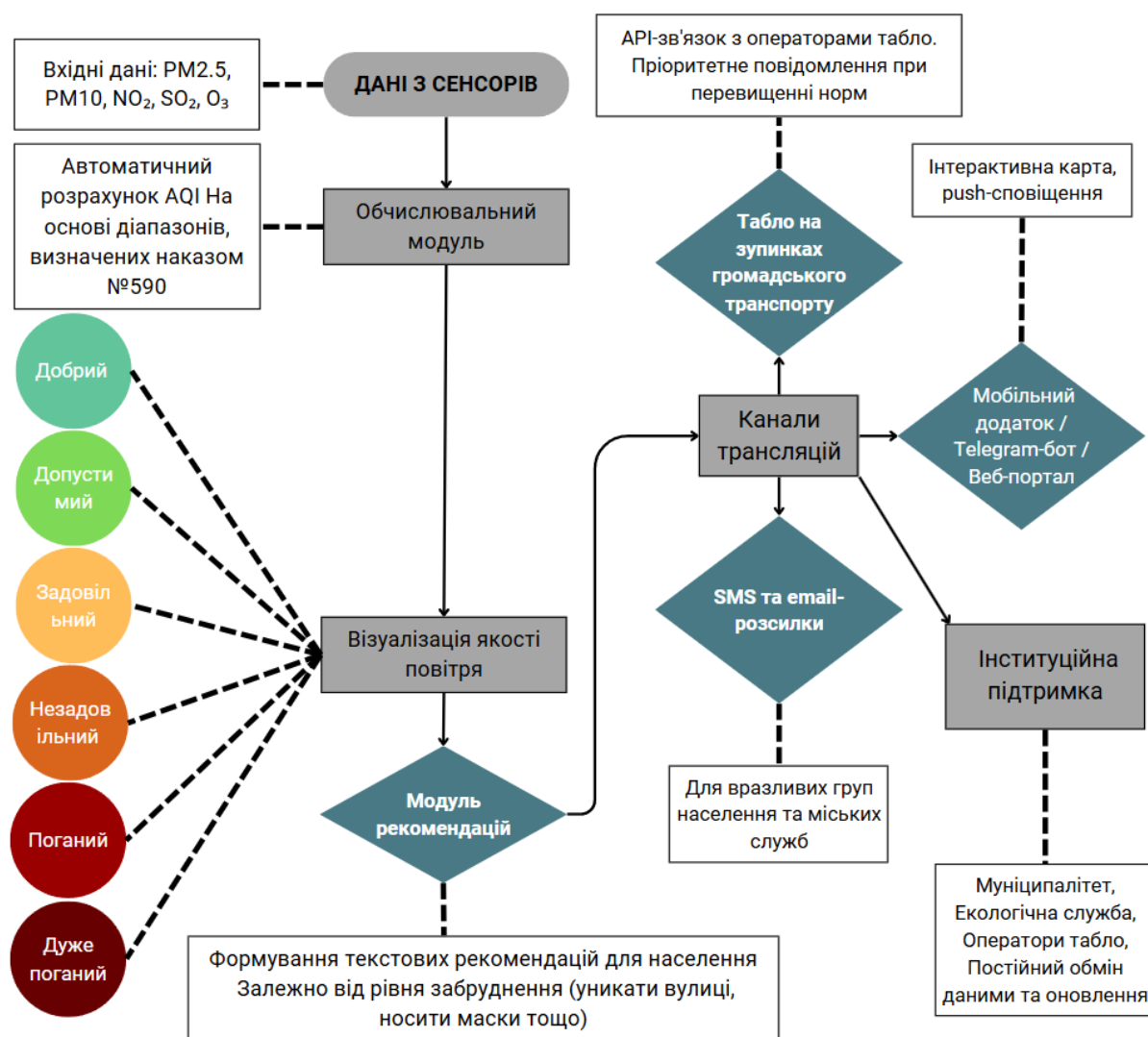


Рисунок 3.9 – Алгоритм функціонування підсистеми оперативного інформування населення про якість атмосферного повітря

Таким чином, реалізована підсистема є адаптивною до нових норм, зокрема наказу №590, та враховує найкращі міжнародні підходи до візуалізації та трансляції екологічної інформації. Використання кольорової шкали дозволяє уніфікувати сприйняття рівнів екологічної загрози серед населення, включаючи вразливі групи [126, 131].

Це підвищує рівень екологічної обізнаності та формує відповідальне ставлення до стану довкілля (рис. 3.10).

Забруднююча речовина	Добрий	Допустимий	Задовільний	Незадовільний	Поганий	Дуже поганий
$TC_{2.5}$ (тверді частки)	0–10	11–20	21–25	26–50	51–75	76–800
TC_{10} (тверді частки)	0–20	21–40	41–50	51–100	51–100	151–1200
Озон	0–50	51–100	101–130	131–240	241–380	381–800
Діоксид азоту	0–40	41–90	91–120	121–230	341–340	341–1000
Діоксид сірки	0–100	101–200	201–350	351–500	501–750	751–1250

Рисунок 3.10 – Показники індексу якості повітря в Україні на основі рівнів забруднюючих речовин (мкг/м³)

3.8. Оцінка ефективності розробленої програми моніторингу та реалізація коригувальних заходів

У межах реалізації Програми на 2022–2026 роки з розвитку мережі моніторингу передбачено встановлення 9 постів спостереження. Вони проєктуються згідно з вимогами Постанови Кабінету Міністрів України № 827 від 14 серпня 2019 року, яка визначає порядок функціонування системи державного моніторингу довкілля та встановлює технічні вимоги до її елементів. Розміщення постів планується з урахуванням щільності населення, джерел забруднення та пріоритетності територій за рівнем навантаження (табл. 3.3). Запровадження цих пунктів дозволить забезпечити надійний моніторинг повітря [141].

Таблиця 3.3 – Розміщення та кількість пунктів спостереження (по постах)

№	Місце розташування пункту спостережень (адреса/координати) або маршрут	Тип пункту спостережень (міський транспортний, міський фоновий, міський промисловий, сільський фоновий, змішаний)	Перелік речовин*	Примітки
1	Стаціонарний пункт № UA2331001 – Площа Єдності, 48.4794, 34.928	змішаний міський транспортний, міський фоновий	Діоксид азоту та оксиди азоту, ТЧ10 та ТЧ2.5, оксид вуглецю та озон	№UA2331001
2	Стаціонарний пункт № UA 2331002 – просп. Мазепи–Криворізька (школа № 50), 48.448098, 34.968383	змішаний міський фоновий, промисловий	Діоксид азоту та оксиди азоту, ТЧ10 та ТЧ2.5, озон, діоксид сірки	№UA2331002
3	Стаціонарний пункт № UA2311003 – вул. Бориса Кротова, Пенсійний фонд, 48.408, 34.997398	змішаний міський транспортний, промисловий	Діоксид азоту та оксиди азоту, ТЧ10 та ТЧ2.5, оксид вуглецю, діоксид сірки	№ UA2311003
4	Стаціонарний пункт № UA2331004 – площа Героїв Майдану (туристичний інформаційний центр), 48.464, 35.0461	міський змішаний транспортний, фоновий	Діоксид азоту та оксиди азоту, ТЧ10 та ТЧ2.5, оксид вуглецю, озон	№ UA2331004
5	Стаціонарний пункт № UA2331005 – Лівий берег (ТРЦ «Вавілон»), 48.4832, 35.0625	міський змішаний транспортний, фоновий	Діоксид азоту та оксиди азоту, ТЧ10 та ТЧ2.5, оксид вуглецю, озон	№ UA2331005

Продовження табл. 3.2.

№	Місце розташування пункту спостережень (адреса/координати) або маршрут	Тип пункту спостережень (міський транспортний, міський фоновий, міський промисловий, сільський фоновий, змішаний)	Перелік речовин*	Примітки
6	Стаціонарний пункт № UA2311006 – просп. Петра Калнишевського, 48.509628, 35.085211	міський змішаний транспортний, фоновий, промисловий	Діоксид азоту та оксиди азоту, ТЧ10 та ТЧ2.5, озон, оксид вуглецю, діоксид сірки	№ UA23110 06
7	Стаціонарний пункт № UA2311007 – Донецьке шосе – вулиця Висоцького, 48.509788, 34.987021	міський змішаний транспортний, фоновий	Діоксид азоту та оксиди азоту, ТЧ10 та ТЧ2.5, оксид вуглецю, озон	№ UA23110 07
8	Стаціонарний пункт № UA2321008 – вул. Березинська (ТРЦ «Караван»), 48.529499, 35.028198	міський змішаний транспортний, фоновий	Діоксид азоту та оксиди азоту, ТЧ10 та ТЧ2.5, оксид вуглецю, озон.	№ UA23210 08
9	Стаціонарний пункт № UA2321009 – Набережна перемоги (кільце) 48.425098, 35.063598	міський змішаний транспортний, фоновий, промисловий	Діоксид азоту та оксиди азоту, ТЧ10 та ТЧ2.5, оксид вуглецю, діоксид сірки, озон	№ UA23210 09

Наступна інфографіка (рис 3.11) відображає логіку реалізації моніторингу атмосферного повітря, спрямованого на удосконалення функціонування системи в умовах сучасних викликів. У структурі схеми виділено чотири ключові блоки, які охоплюють основні напрями роботи в межах оцінювання ефективності та адаптації програми.

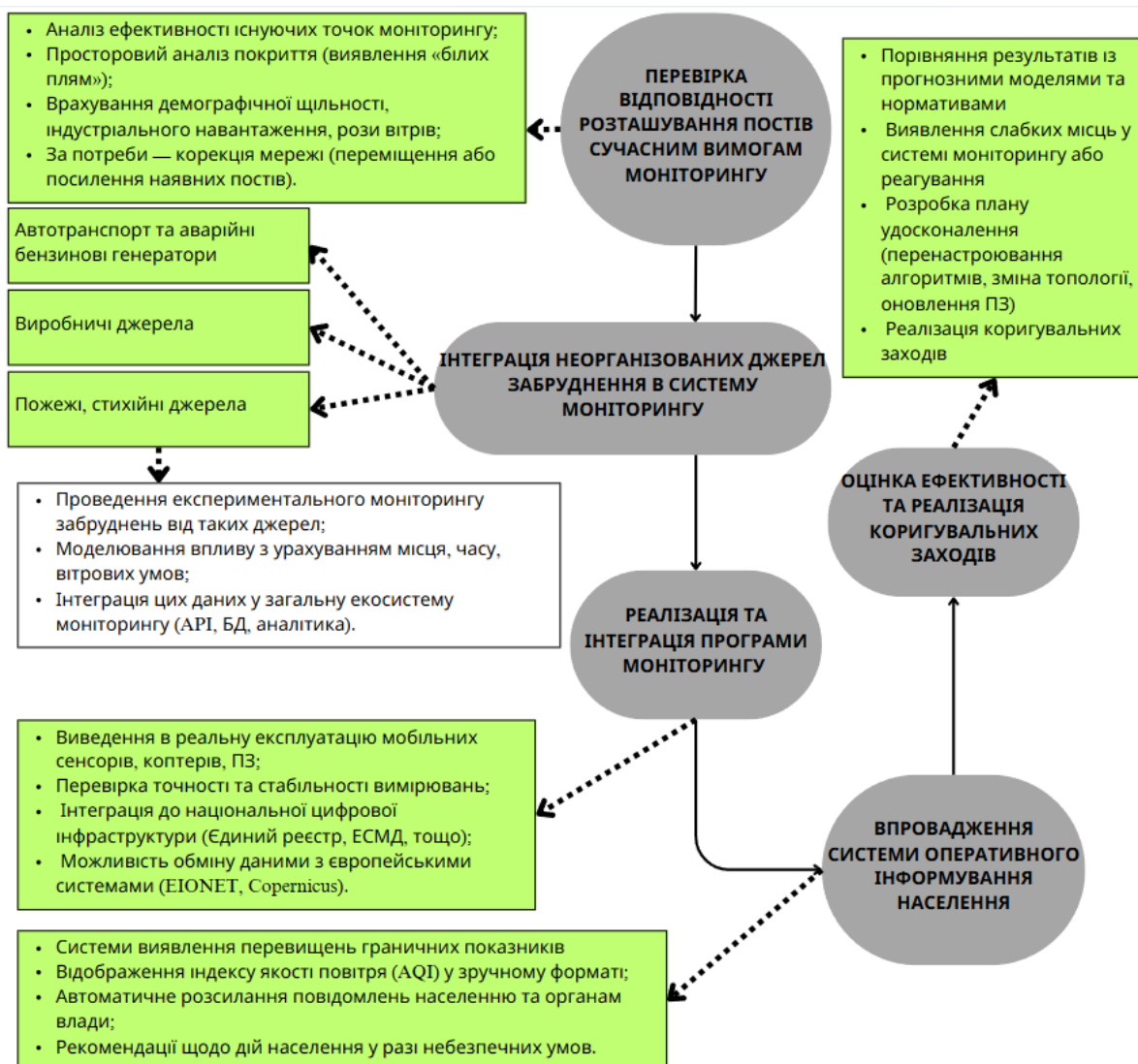


Рисунок 3.11 – Оцінка ефективності розробленої програми моніторингу та реалізація коригувальних заходів

Першим етапом є перевірка актуальності та репрезентативності місцерозташування постів спостереження, що передбачає вибір об'єктів для оцінювання та можливе оновлення мережі моніторингу на основі сучасних вимог. Наступним блоком є інтеграція різних неорганізованих джерел забруднення в систему – таких як генератори, автотранспорт, промислові підприємства та пожежі – що дає змогу комплексно враховувати вплив на повітряне середовище. Далі реалізується оперативне інформування населення про небезпечні рівні забруднення, з використанням автоматизованих повідомлень і рекомендацій. Усі ці етапи підпорядковані загальній меті – створення адаптивної, надійної та ефективної системи моніторингу, яка здатна

оперативно реагувати на екологічні виклики та сприяти зниженню ризиків для здоров'я населення.

Загалом інфографіка демонструє логіку інтегрованого, динамічного підходу до вдосконалення системи моніторингу атмосферного повітря, де кожен з етапів взаємопов'язаний і підпорядкований головній меті – забезпеченню надійного контролю за якістю повітря та захисту здоров'я населення. За потреби її можна доповнити фінальним етапом оцінки ефективності з наступною реалізацією коригувальних заходів, що забезпечить замкнутий цикл постійного вдосконалення.

Висновки за розділом

У межах третього розділу здійснено практичну реалізацію теоретичних положень, розроблених у попередніх етапах дослідження, що дозволило підтвердити ефективність створеної системи моніторингу атмосферного повітря та її адаптивність до реальних умов функціонування в міському середовищі, зокрема в умовах воєнного стану.

Проведено обґрунтування розміщення оновленої мережі постів моніторингу атмосферного повітря в агломерації Дніпро з використанням геоінформаційної системи «ДніпроМАП» у середовищі ArcGIS. До складу ГІС включено ключові шари: промислові зони, джерела викидів, щільність населення, індекси транспортного забруднення, конфігурацію рельєфу, СЗЗ, зони підвищених концентрацій забруднюючих речовин і потенційні точки живлення стаціонарних приладів. Такий підхід забезпечив просторово обґрунтоване планування мережі моніторингу.

У межах дослідження проаналізовано побутовий генератор як неорганізоване джерело забруднення, характерне для умов відключення електропостачання. Вимірювання концентрацій CO, CO₂, CH₂O, PM_{2.5} та PM₁₀ виявили перевищення допустимих рівнів для CO, формальдегіду та пилу, що підтверджує доцільність включення таких джерел до системи моніторингу.

Паралельно були здійснені фонові вимірювання як за межами агломерації, так і в межах рекреаційних зон. Це дозволило оцінити базовий рівень забруднення та чутливість запропонованої системи до локальних змін якості повітря.

Реалізовано технологічне інтегрування розробленої програми моніторингу в національні та міжнародні системи екологічного контролю. Доведено сумісність з вимогами чинного українського законодавства, а також забезпечено технічну готовність до вивантаження даних у формати, що підтримуються глобальними екологічними платформами (OpenAQ, EEA, CAMS).

Окрему увагу приділено етапу впровадження системи оповіщення населення про несприятливі рівні забруднення атмосферного повітря. Заплановано та картографічно обґрунтовано розміщення дев'яти нових стаціонарних пунктів спостереження в агломерації Дніпро відповідно до державних нормативів, а також реалізовано мобільні маршрути вимірювання з метою оперативного контролю повітря на локаціях без можливості встановлення стаціонарних приладів.

Проведена оцінка ефективності розробленої програми дозволила виявити низку переваг системи, серед яких: стабільна робота в аварійних умовах, автономність, мобільність, інтелектуальна обробка даних, оперативна візуалізація, відповідність національним та міжнародним стандартам, гнучкість до оновлення та модернізації.

Таким чином, запропонована система моніторингу може бути рекомендована до подальшого масштабного впровадження на регіональному та національному рівнях з перспективою повної інтеграції у світову систему моніторингу стану атмосферного повітря та екологічної безпеки.

Результати досліджень відображені у публікаціях [126, 131, 141].

РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЯ З УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ АГЛОМЕРАЦІЙ

4.1. Технологія з розгортання удосконаленої системи моніторингу атмосферного повітря на різних рівнях

Технологія з розгортання удосконаленої системи моніторингу важлива, тому що враховує особливості впровадження на різних рівнях – від локального до регіонального, а від регіонального до міжнародного. Розроблена технологія базується на принципах поетапності, послідовності, гнучкої адаптації до умов моніторингу і змін в Законодавстві, а також забезпечення сумісності з національними і світовими стандартами та практиками.

Для організації локального рівня системи моніторингу атмосферного повітря запропоновано технологічну схему, що забезпечує поетапне розгортання мережі моніторингу відповідно до специфіки об'єкта спостереження (підприємство, населений пункт), де як приклад взято агломерацію Дніпро. Схема передбачає аналіз характеристик об'єкта, вибір пріоритетних забруднюючих речовин, оцінку необхідності встановлення постів конкретного типу, що важливо як для ефективного моніторингу так і для еколого-економічного обґрунтування фінансових витрат, технічне оснащення мережі та організацію збору даних (рис. 4.1):

Рівень 1 – Базовий: Локальний моніторинг

Етап 1.1. Ідентифікація об'єкта моніторингу. На першому етапі визначається тип об'єкта, де планується впровадження моніторингу (населений пункт, промисловий об'єкт, транспортний вузол тощо). Проводиться попередній аналіз джерел забруднення, їхнього типу, характеру та ймовірного впливу на довкілля. Важливо приділяти увагу класифікації джерел викидів та їх небезпеки, що дозволяє визначити необхідність контролю за певними групами забруднюючих речовин, їх класи небезпеки та ГДК.

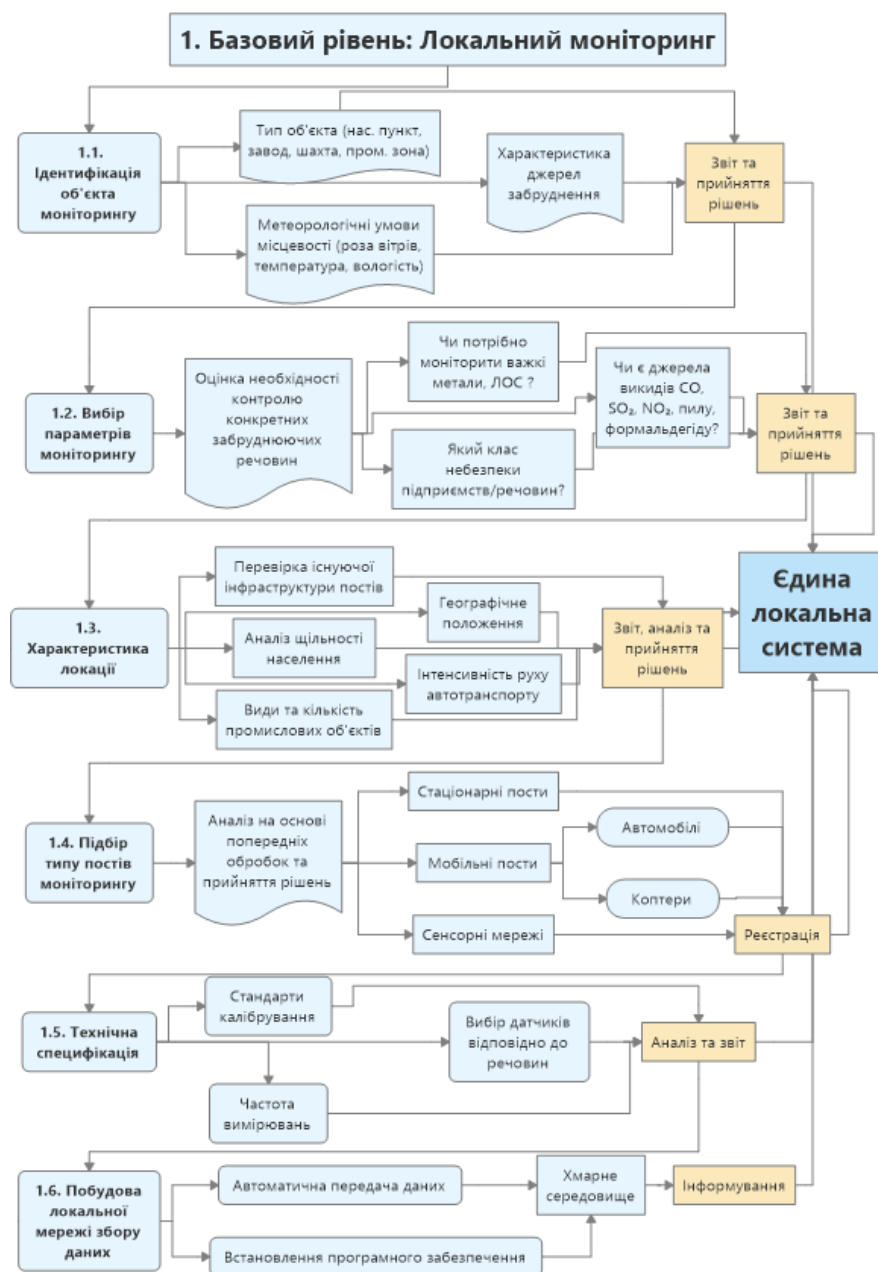


Рисунок 4.1 – Перший рівень розгортання системи моніторингу – локальний

Етап 1.2. Вибір параметрів моніторингу. Після визначення об'єкта, проводиться оцінка метеорологічних умов (роза вітрів, температура, вологість) та екологічних ризиків, пов'язаних з викидами забруднюючих речовин у повітря. Доцільним є проведення розрахунків розсіювання. Це дозволяє обґрунтовано підійти до вибору конкретних параметрів – наприклад, концентрацій пилу (PM2.5, PM10), діоксиду азоту (NO₂), озону (O₃), оксиду вуглецю (CO), оксиду сірки (SO₂) або інших. Визначається доцільність моніторингу летких органічних сполук (ЛОС) чи формальдегіду (CH₂O).

Етап 1.3. Характеристика локації. Аналізуються особливості місцевості: географічне розташування, рельєф, наявність житлової забудови, щільність населення, промислових зон, інтенсивності руху на автомагістралях (при їх наявності). Важливими чинниками тут є: щільність населення, інтенсивність руху автотранспорту, типи і кількість підприємств. Це дає змогу обґрунтувати рівень пріоритетності для встановлення постів моніторингу.

Етап 1.4. Підбір типу постів моніторингу. На цьому етапі здійснюється вибір між стаціонарними, мобільними та сенсорними постами. Залежно від завдань можуть застосовуватись пости з повноцінними аналітичними та/або лабораторними установками або компактні мобільні пости, що встановлюються на автомобілях або у зонах з нестабільними умовами. Допускається і висновок щодо недоцільності всіх перелічених – в такому разі можна розглянути можливість моніторингу за допомогою аерокopterів з газоаналізаторами.

Етап 1.5. Технічна специфікація. Відповідно до обраних параметрів і типів постів, здійснюється підбір відповідного вимірювального обладнання, забезпечується стандартизація процесу калібрування сенсорів та датчиків.

Етап 1.6. Побудова локальної мережі збору даних. Завершальним етапом локального рівня є організація збору та обробки даних, а як результат – інформування населення: реалізується автоматизована передача інформації у хмарне середовище або локальний сервер, встановлюється програмне забезпечення для візуалізації та інформування.

Кожен з цих етапів містить логічні розгалуження для адаптації системи під особливості конкретної території, що забезпечує гнучкість та технологічність процесу розгортання.

Наступним, другим етапом технології є розгортання системи моніторингу атмосферного повітря на регіональному рівні, що передбачає об'єднання локальних мереж спостереження в єдину регіональну систему збору та аналізу даних. Технологічна схема, наведена на рис. 4.2, відображає основні процедури, необхідні для стандартизації згідно з нормами

Законодавства форматів даних, створення центрів збору інформації, забезпечення відповідності державним та європейським нормам, а також формування національного реєстру постів спостереження за повітрям:

Рівень 2 – Регіональний: Національна інтеграція

Етап 2.1. Об'єднання локальних систем. Цей етап передбачає створення інфраструктури на обласному чи регіональному рівні, що дозволяє обробляти та зберігати дані з локальних мереж. Налаштовується автоматизований збір через API, стандартизуються формати обміну (JSON, CSV, XML). Забезпечується безпечна передача даних захищеними каналами зв'язку з локальних хмарних середовищ.

Етап 2.2. Забезпечення відповідності стандартам. Імплементуються національні стандарти та норми ЄС (наприклад, Директива 2008/50/EC). Визначаються рівні інформування та тривоги для населення. Забезпечується відповідність параметрам моніторингу, методам вимірювання та процедурі валідації результатів.

Етап 2.3. Створення національного реєстру станцій моніторингу

Пости моніторингу повітря проходять каталогізацію з присвоєнням унікальних ідентифікаторів. Визначаються координати розташування, тип постів (стаціонарний, мобільний тощо). Створюються інтерактивні карти з публічним доступом до даних або підтримуються вже існуючі карти, реалізується API для сторонніх систем.

Етап 2.4. Алгоритми аналітики

На основі зібраних даних формуються моделі для розрахунку індексу якості повітря (ІЗА) за формулами, що рекомендовані ВООЗ і національними методичними рекомендаціями. Застосовуються алгоритми машинного навчання (LSTM, Random Forest або інші) з урахуванням метеоданих для побудови короткострокових прогнозів.

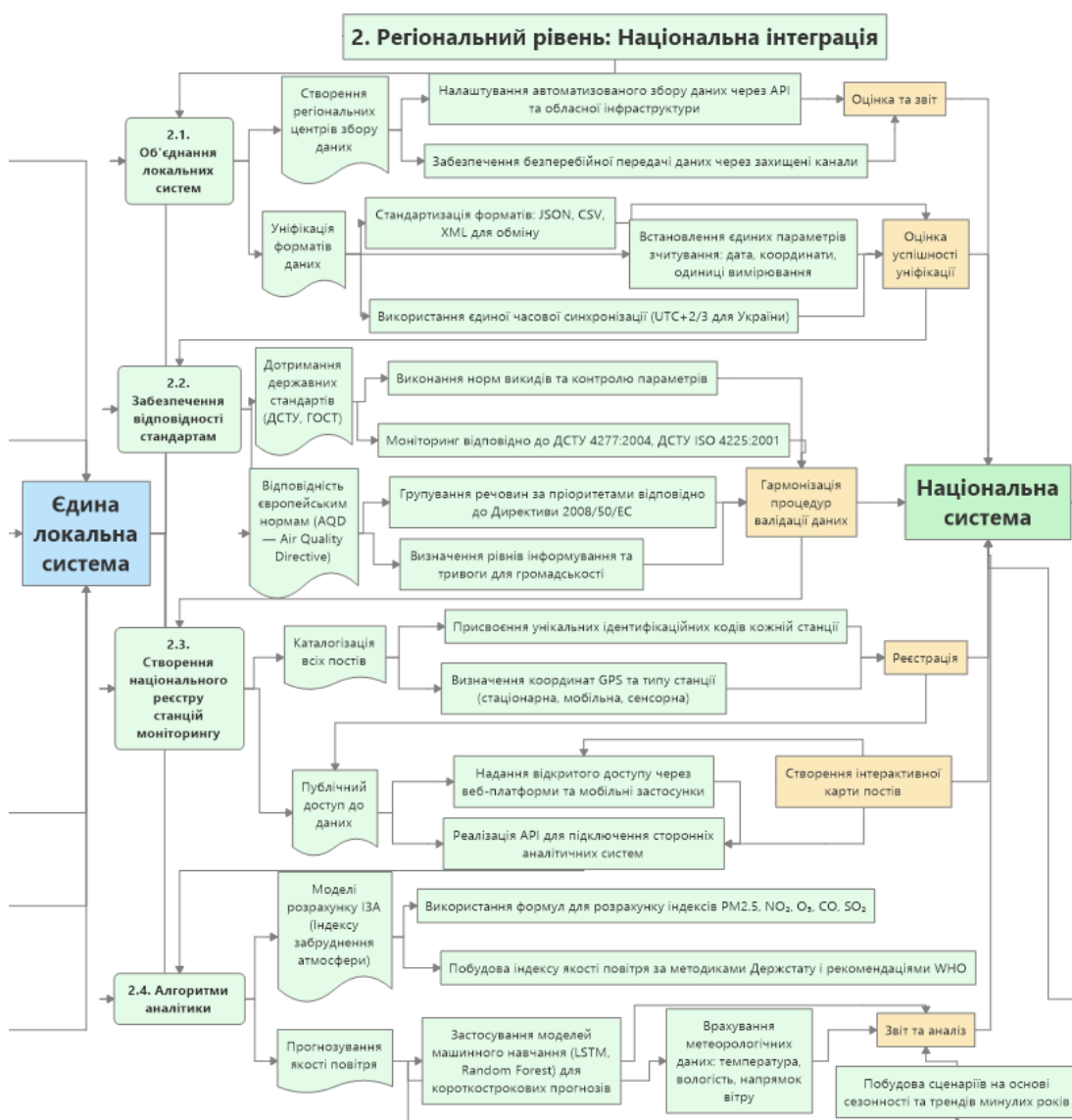


Рисунок 4.2 – Другий рівень розгортання системи моніторингу – регіональний

Особливу увагу приділено впровадженню алгоритмів аналітики для розрахунку індексів якості повітря та прогнозування змін стану атмосферного повітря. Цей підхід ефективно забезпечує гнучкість інтеграції, оперативність обробки даних та відповідність сучасним міжнародним вимогам у сфері моніторингу повітря.

Рівень 3 – Міжнародний: Інтеграція в світові мережі

Міжнародний рівень впровадження системи моніторингу атмосферного повітря спрямований на інтеграцію з відомими та провідними міжнародними екологічними програмами, системами обміну даними та науковими мережами,

а також об'єднаннями. Цей рівень забезпечує відповідність глобальним вимогам щодо форматів даних, стандартів вимірювань та процедур звітності (рис. 4.3):

Етап 3.1. Огляд міжнародних систем моніторингу. На цьому етапі проводиться аналіз чинних європейських та світових програм. До них належать: EIONET-AirBase – мережа Європейського агентства довкілля; CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) – використання супутникових даних для просторового аналізу атмосферних показників; WMO, GAW – участь у глобальних кліматичних і метеорологічних мережах з метою стандартизації вимірювань і доступу до даних.

Етап 3.2. Вимоги до обміну даними. Для того, аби національна система відповідала міжнародним вимогам, впроваджуються стандартизовані формати передачі та обміну: OpenAQ API (JSON) – для відкритого обміну даними; INSPIRE – європейська інфраструктура просторових даних. Важливим елементом є буферизація – збереження та передача даних у випадку збою в каналах зв'язку. Цей підпункт пов'язує технічні та організаційні аспекти інтеграції з міжнародними хабами даних.

Етап 3.3. Адаптація національної системи до міжнародних стандартів. Передбачає уніфікацію опису станцій (тип сенсорів, місце розташування, метод калібрування тощо), а також гармонізацію метаданих.

Застосовуються єдині одиниці вимірювання: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – для концентрацій твердих частинок (PM); ppm, ppb – для газоподібних речовин (NO_2 , SO_2 , CO); $^{\circ}\text{C}$ і hPa – як температурні й тискові стандарти.

Окрім технічної уніфікації, важливим завданням є стандартизація ідентифікаторів станцій, що забезпечує можливість глобальної агрегації даних.

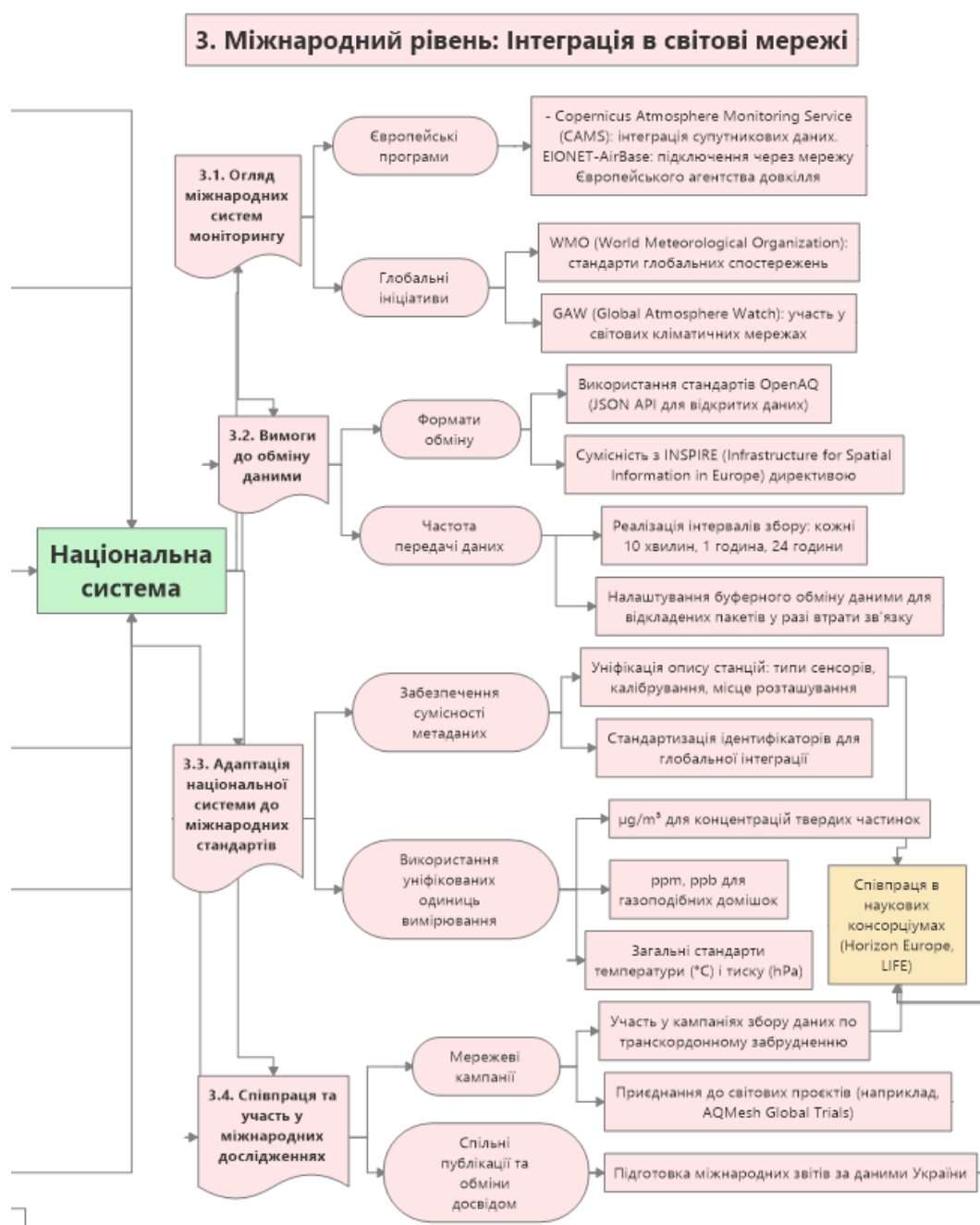


Рисунок 4.3 – Третій рівень розгортання системи моніторингу – міжнародний

Етап 3.4. Співпраця та участь у міжнародних дослідженнях.

Завершальним етапом є участь у глобальних дослідницьких проєктах, обмін даними та спільні звіти: трансграничні проєкти збору даних – наприклад, для аналізу забруднення, що переноситься з інших країн; приєднання до проєктів типу AQMesh, Global Trials – участь у валідаційних випробуваннях датчиків, сенсорів, алгоритмів; підготовка міжнародних звітів – формування національних даних у відповідному форматі; наукова співпраця – участь у

консорціумах Horizon Europe, LIFE та інших міжнародних грантових програмах.

Таким чином, процес розгортання удосконаленої системи моніторингу атмосферного повітря реалізується як послідовна ієрархічна інтеграція трьох рівнів: локального, регіонального та міжнародного (Додаток Д) Їх зв'язок ґрунтується на уніфікації даних, стандартизації форматів обміну, процедур валідації та централізованій обробці інформації.

Поєднання рівнів 1 – 2: Локальний рівень виконує функцію первинного збору та передачі даних у реальному часі з різних типів постів (стаціонарних, мобільних, сенсорних), розгорнутих з урахуванням місцевої специфіки – щільності населення, промислових зон, метеоумов.

Таким чином, локальні дані стають частиною національного інформаційного контуру, де вони агрегуються, аналізуються, і використовуються для аналітики та прийняття управлінських рішень.

Поєднання рівнів 2 – 3: Регіонально-національний рівень акумулює інформацію з усіх областей, формує єдину структуру метаданих, забезпечує валідацію, та формує API для відкритого доступу й підключення зовнішніх систем.

Цей зв'язок дозволяє українській системі моніторингу бути повноцінним учасником глобальних дослідницьких мереж, отримувати підтримку від Horizon Europe, CAMS, WMO, та забезпечувати двосторонній обмін знаннями і даними.

4.2. Інвентаризація джерел викидів як перший етап практичної реалізації технології розгортання системи моніторингу атмосферного повітря в агломерації

Інвентаризація джерел забруднення є першим і ключовим етапом практичного розгортання системи моніторингу атмосферного повітря в агломерації Дніпро. Вона включає аналіз стаціонарних, пересувних та

природних джерел викидів забруднюючих речовин, а також врахування географічних, демографічних і функціональних особливостей міста.

У місті функціонують десятки стаціонарних джерел, що є основними промисловими підприємствами. Найбільшими з них за обсягами викидів були:

Відокремлений підрозділ «Придніпровська ТЕС» – 19 740 т/рік,

ПАТ «ЄВРАЗ ДМЗ» – 2 506,8 т/рік,

ПАТ «Інтерпайп НТЗ» – 807,2 т/рік.

Ці три підприємства дали понад 85 % усіх зафіксованих стаціонарних викидів серед топ–10 забруднювачів. Загалом, обсяг викидів цими підприємствами складав понад 25 тис. тонн.

Крім промисловості, важливими джерелами є:

Транспорт – 58 092 транспортних засоби, з яких 49 776 належать фізичним особам. Цей сегмент формує не менше 30 % загального забруднення повітря.

Інші джерела – 133 об'єкти утворення відходів, 28 об'єктів утилізації, а також щорічні пожежі (1700 випадків).

Враховуючи щільність населення (2394 осіб/км²), наявність промислових кластерів, густу дорожню мережу (1,3425 тис. км твердого покриття) та кількість об'єктів забруднення, визначено потребу в мінімум 5 стаціонарних постах спостереження.

Їх оптимальне розміщення повинно відповідати зонам:

1. Промисловим (райони Придніпровська ТЕС, ЄВРАЗ, Інтерпайп);
2. Транспортним вузлам (центральні магістралі, зони щільної забудови);
3. Житловим районам із високою демографічною щільністю (Соборний, Шевченківський).

Ці дані дозволяють не лише визначити навантаження на атмосферу, а й закласти основу для подальшого контролю й прогнозування якості повітря.

Для розгортання системи моніторингу повітря, потрібно мати дані КІЗА, аби визначати необхідну кількість постів та технічне оснащення (рис. 4.4)

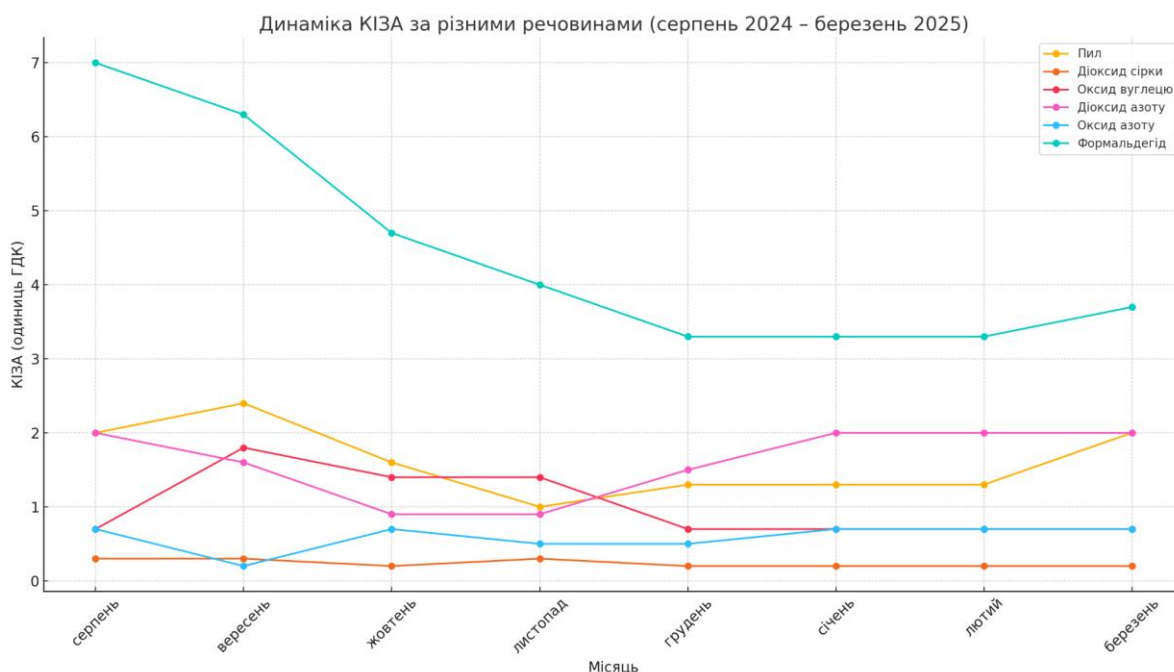


Рисунок 4.4 – Динаміка КІЗА за різними речовинами

Побудований графік динаміки КІЗА (коефіцієнтів індексу забруднення атмосфери) за 8 місяців 2024–2025 років для м. Дніпро. На ньому добре видно, що:

- діоксид азоту та пил демонструють стабільно високі значення в межах 1,5–2,4 ГДК;
- оксид вуглецю та фенол – мають коливання, але не виходять за межі 2 ГДК;
- оксиди сірки та азоту – нижче порогових значень, проте системно присутні.

У межах етапу оцінки фактичного забруднення атмосферного повітря агломерації Дніпро використано щомісячні дані про середньомісячні концентрації основних забруднюючих речовин (пил, діоксид сірки, оксид вуглецю, діоксид азоту, фенол, аміак, формальдегід) за період серпень 2024 – березень 2025 року.

На основі даних розраховані значення КІЗА для кожного місяця, які наведено у таблиці та представлені в табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Показники КІЗА

Місяць	КІЗА
Серпень	16,2
Вересень	17,2
Жовтень	15,9
Листопад	16,8
Грудень	15,5
Січень	14,7
Лютий	15,0
Березень	14,2

Результати інвентаризації джерел викидів та аналізу концентрацій забруднюючих речовин дозволяють стверджувати, що ефективна система моніторингу атмосферного повітря в агломерації Дніпро повинна базуватись на комплексному підході, що включає:

- виявлення основних джерел забруднення (промислові підприємства, транспорт, природні чинники);
- територіальне зонування із виділенням зон максимальної антропогенної дії (промислові райони, транспортні коридори, густозаселені житлові квартали);
- оцінку динаміки забруднення шляхом обчислення інтегральних індексів (КІЗА) у розрізі часу та території.

Розміщення постів у стратегічно важливих точках міста (виходячи з інвентаризаційних даних та локальних піків КІЗА) забезпечить системне та репрезентативне охоплення просторово-часових змін стану повітря. А регулярний моніторинг із фіксацією концентрацій дозволить оперативно реагувати на перевищення ГДК та прогнозувати екологічні ризики.

Практична реалізація системи моніторингу за результатами інвентаризації та аналізу рівнів забруднення атмосферного повітря передбачає створення додаткової кількості постів спостереження.

Враховуючи просторовий розподіл джерел забруднення, транспортне навантаження та щільність населення, у місті Дніпро необхідно встановити щонайменше 7 стаціонарних постів моніторингу: 3 – у безпосередній близькості до найбільших стаціонарних джерел (Придніпровська ТЕС, ЄВРАЗ, Інтерпайп), 2 – у транспортно навантажених зонах (центральної перехрестя, проспекти), 2 – у житлових районах із високою щільністю населення (Соборний, Шевченківський).

Обладнання постів. Кожен пост має бути оснащений:

- автоматизованим аналізатором пилу, формальдегіду, діоксиду азоту, вуглецю та сірководню;
- метеостанцією для реєстрації швидкості й напрямку вітру, температури, вологості.

Частота вимірювань. Для забезпечення точності розрахунків КІЗА та тенденцій:

- автоматизований збір даних кожні 30 хв;
- щоденна передача даних до центральної бази ДніпроОЦГМ для аналізу.

Інтеграція з GIS-системою міста. Для візуалізації даних у реальному часі та ухвалення рішень – інтеграція моніторингу з муніципальною системою просторового планування.

Розрахунок КІЗА щомісяця автоматично на основі даних постів – для формування екологічного рейтингу районів.

4.3 Обґрунтування місць розташування станцій моніторингу на територіях промислових агломерацій з урахуванням забруднення та щільності населення, як вагомий елемент реалізації технології

Основні питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря затверджені в Постанові Кабміну № 827 від 14 серпня 2019 р. [142], а порядок розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях – в наказі МВС № 300 від

21.04.2021 [83]. В останньому затверджено типи постів та їх мінімальна кількість, залежно від кількості населення та кількості пріоритетних забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.

Натомість немає документу чи методики де зазначалась би процедура обґрунтування місць розташування пунктів спостережень за результатами попередньої оцінки, оскільки ця задача є не тривіальною і залежить від ситуації та характеристик території для якої розробляється система моніторингу атмосферного повітря. Це питання є актуальним у зв'язку з тим, що збільшення кількості постів призводить з одного боку до підвищення рівня точності та достовірності інформації про якість атмосферного повітря за умови їх оптимального розташування та коректної роботи устаткування, з іншого боку – збільшує вартість системи моніторингу повітря.

Алгоритм обґрунтування місць для розміщення постів спостереження наведено на основі картографічних даних про забруднення атмосферного повітря та щільності населення на міських територіях наведено на рис. 4.5.



Рисунок 4.5 – Алгоритм вибору місця розташування станцій спостереження за результатами попередньої оцінки

Варто зауважити, що навіть значна кількість постів спостереження не призведе до підвищення ефективності системи моніторингу повітря за умови їх некоректного розташування, а неминуче призведе до збільшення капітальних та експлуатаційних витрат, надмірної і не завжди доцільної інформації тощо. Таким чином, обґрунтування необхідної та достатньої кількості станцій спостереження набуває особливої актуальності в умовах обмеженого фінансування міських природоохоронних програм.

Для імплементації підходу згідно наведеним алгоритмом необхідні наступні вихідні дані: мапи приземних концентрацій пріоритетних забруднюючих речовин: SO_2 , CO_2 , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 та ін. за якими зазвичай проводять фіксовані вимірювання на міських територіях (блок 1); статистичні дані про кількість населення в адміністративних районах міста на період планування міської системи моніторингу повітря (блок 2); дані про мережу наявних станцій спостереження, представлену у форматі точкового геопросторового шару даних (блок 3). Усі ці дані можна отримати за результатами попередньої оцінки, (рис. 4.6-4.7)

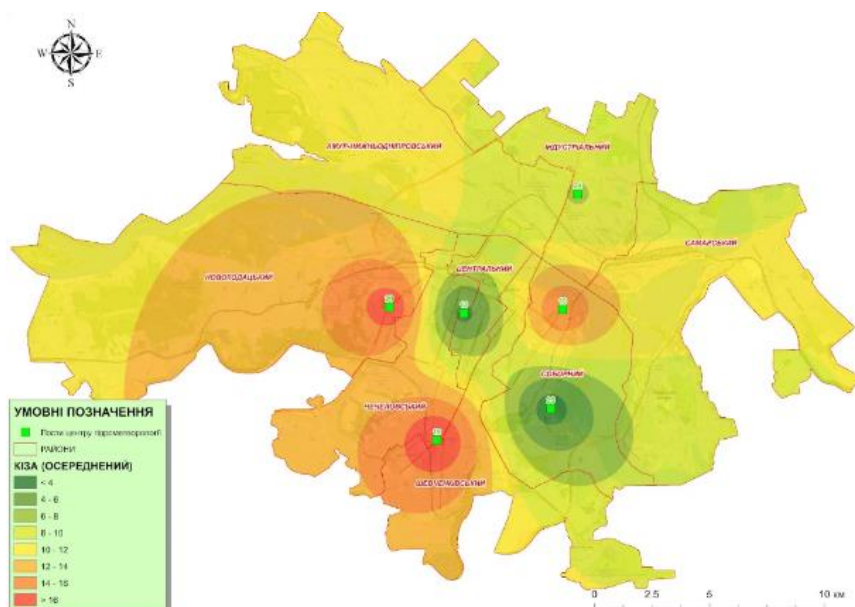


Рисунок 4.6 – Інтерполяція за індексом забруднення повітря

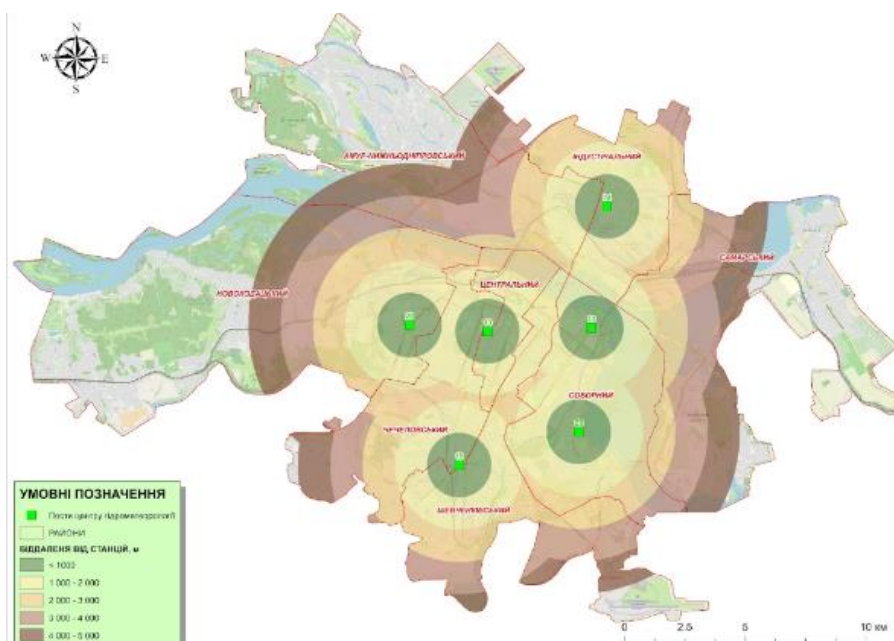


Рисунок 4.7 – Покриття постами моніторингу повітря від РЦГМ

Для реалізації блоку 4 формується градієнтний геопросторовий шар з комплексним індексом забруднення атмосферного повітря на основі шарів за приземною концентрації окремих забрудн речовин у величинах ІЗА (індекс забруднення атмосфери) що враховує ГДК та клас небезпеки певної забруднюючої речовини:

$$KIZA = \sum_{i=1}^n \left(\frac{c_i}{ГДК_i} \right)^a \quad (4.1)$$

де C – значення приземної концентрації певної забруднюючої речовини на окремій ділянці дослідженої території (мг/м^3), a – ступінь небезпеки певної забруднюючої речовини, ГДК – гранично допустима концентрація певної забруднюючої речовини (мг/м^3). Таким чином КІЗА є безрозмірною величиною, що враховує значення ГДК певної забруднюючої речовини та ступінь її небезпеки.

Для реалізації боку 5 формується градієнтна цифрова карта за нормалізованим КІЗА, що знаходиться в діапазоні від 0 до 1, за допомогою формули (4.2)

Для реалізації блоку 7 здійснюється побудова нормалізованої мапи з градієнтом щільності населення саме на території житлової забудови. Таким чином значення щільності будуть перебувати в діапазоні 0 до 1. Значення 0 відповідатимуть території без житлової забудови, а наближені до 1 – максимально можливій щільності.

Основні розрахунково-аналітичні процедури відбуваються в блоці 8, шляхом SQL-запитів до геосервера та співставлення раніше нормалізованих шарів концентрації забруднюючої речовин і щільності населення, а також з урахуванням наявних станцій моніторингу атмосферного повітря. Сенса цього блоку полягає в створенні через математичні функції нового референтного растру для прийняття рішень щодо розміщення нової пости: висока концентрація забруднення та щільність населення призводять до збільшення значень растру, водночас наявність існуючих станцій знижує значення по мірі наближення до них, (рис. 4.9). У якості критерію відстані до найближчих станцій спостереження доцільно зазначати значення від 3000 до 5000 м (рис. 4.10)

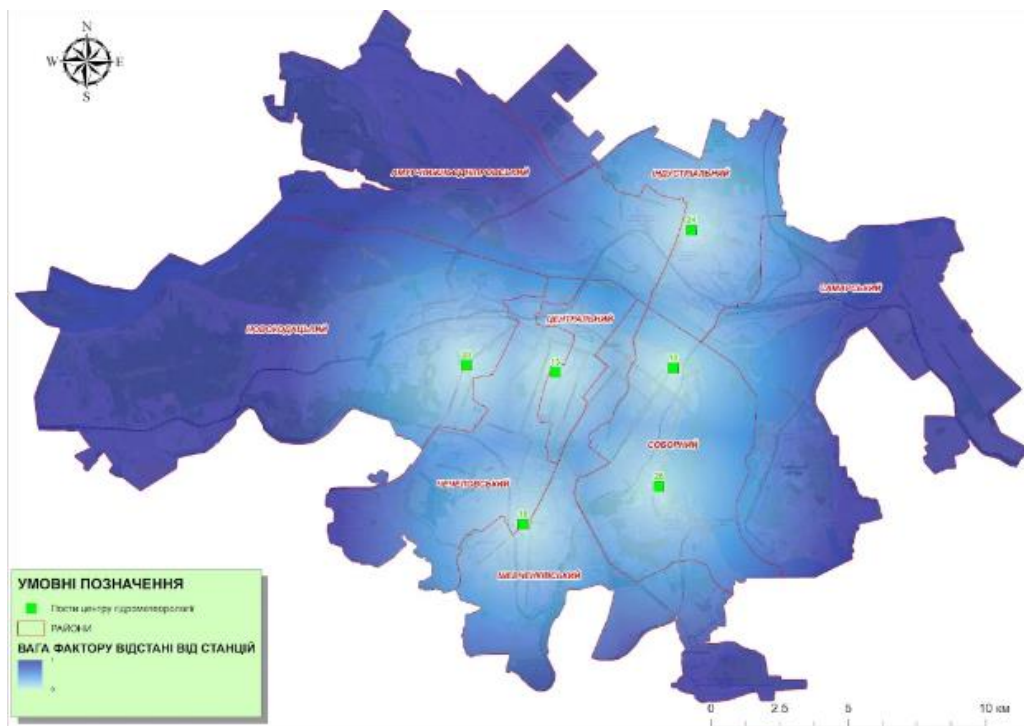


Рисунок 4.9 – Нормування за по відстані від посту спостереження

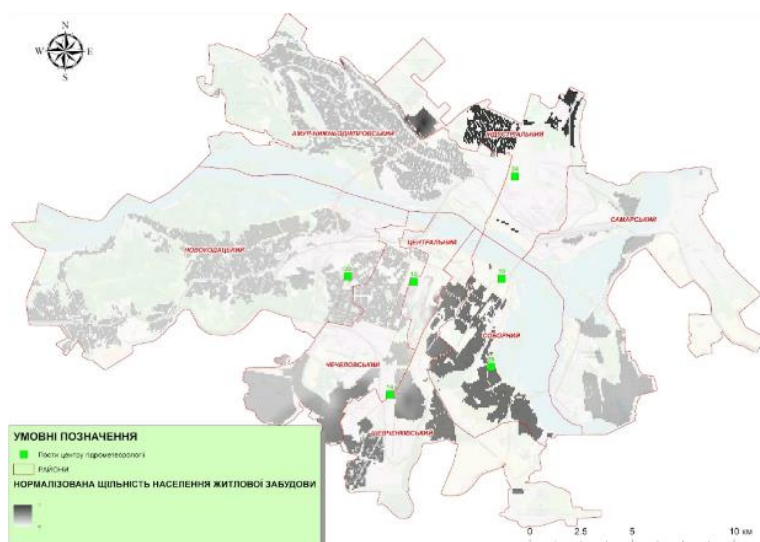


Рисунок 4.10 – Нормалізована щільність населення житлової забудови

В результаті реалізації блоку 9 формується градієнтний растровий шар, на якому найвищі значення вказуватимуть на пріоритетні місця розташування станцій спостереження саме з урахуванням найбільш високих характеристик забруднення, найвищої щільності та рівної віддаленості від інших станцій спостереження, (рис. 4.11-4.14). Таким чином, новий пост спостереження має додаватися до бази даних вже існуючих для подальшого врахування, і дану процедуру слід виконувати після кожного доданого поста доки не буде досягнута їх потрібна кількість.

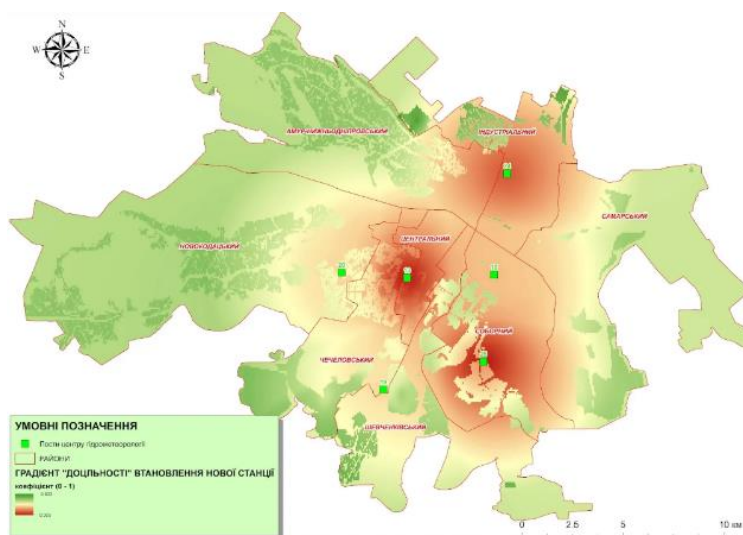


Рисунок 4.11– Градієнт доцільності встановлення нового (додаткового) посту

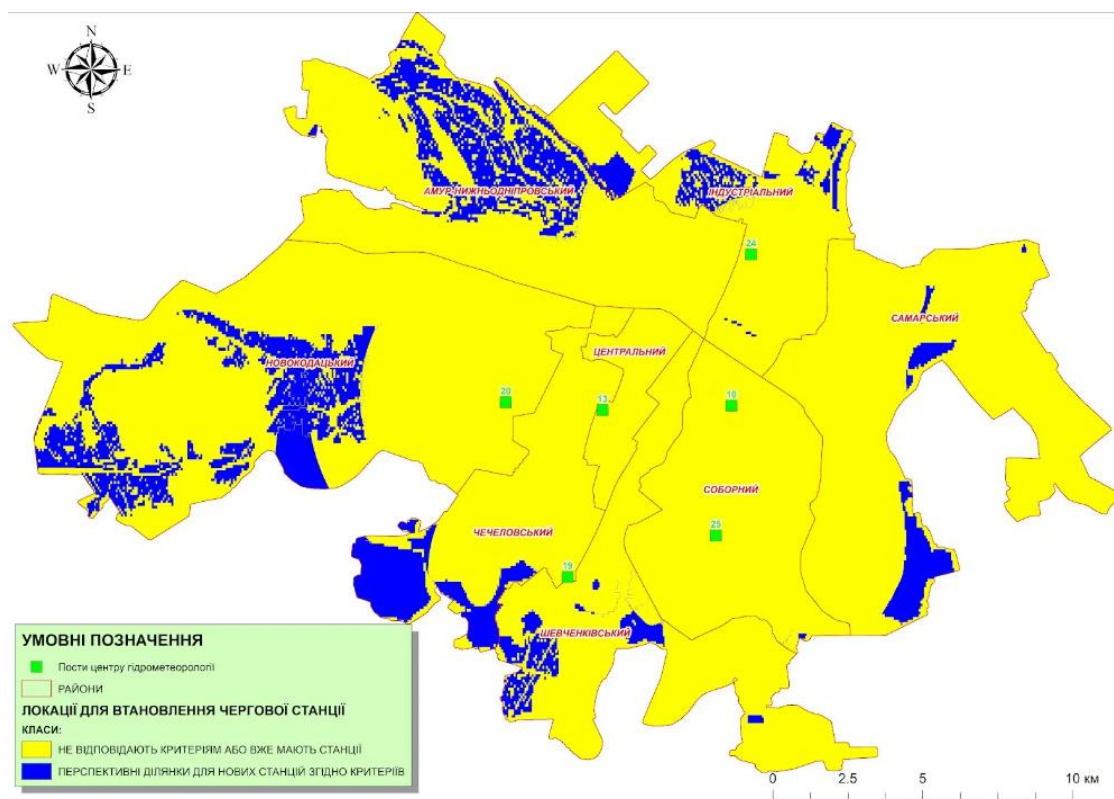


Рисунок 4.12 – Формування локацій для встановлення нового поста згідно з критеріями

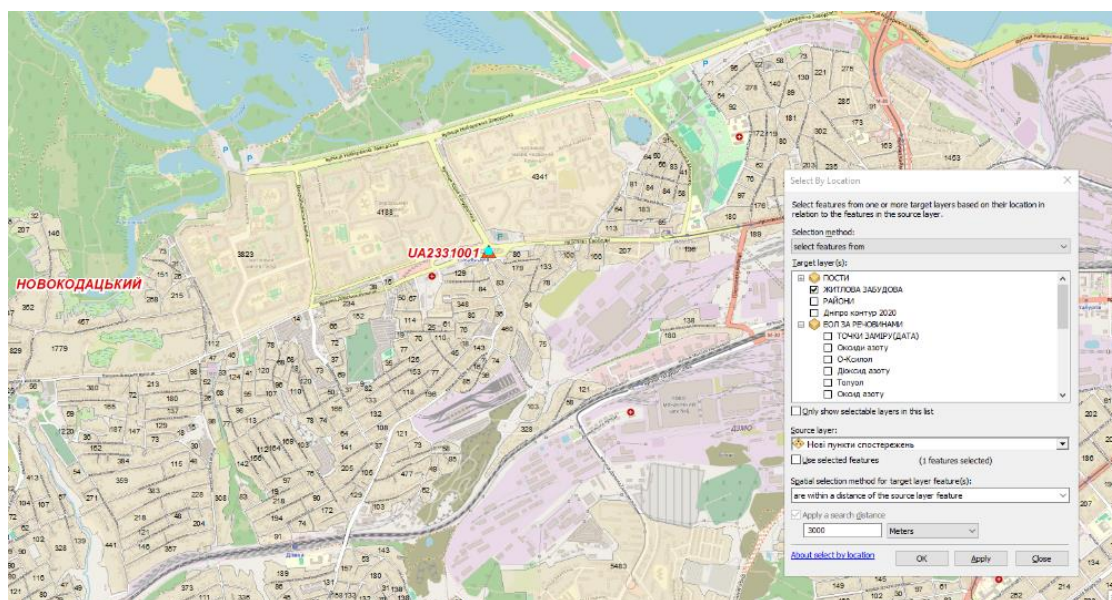


Рисунок 4.13 – Системний запит щодо визначення кількості населення, що мешкає на відстані 3000 м від нового поста

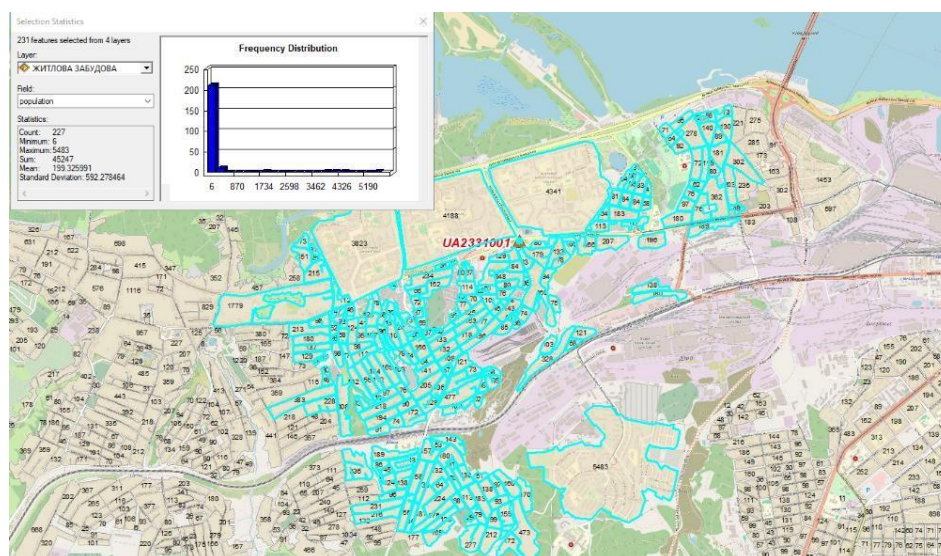


Рисунок 4.14 – Звіт щодо кількості населення, що мешкає на відстані 3000 м від нового поста моніторингу

Реалізація даного алгоритму дозволяє обрати пріоритетні локації для розміщення постів моніторингу.

Задля підвищення ефективності аналізу та визначення міст, доречним є визначити зонування території населеного пункту за КІЗА (рис 4.15).

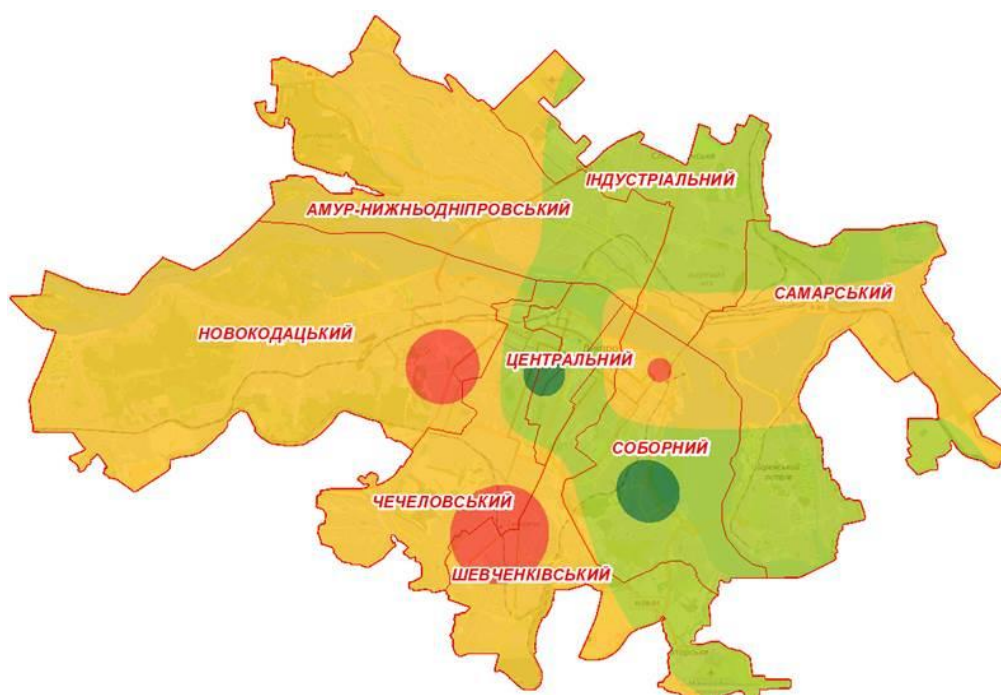


Рисунок 4.15 – Зонування території агломерації Дніпро за КІЗА

Розподіл населення агломерації Дніпро за територіями з різними індексами забруднення атмосфери. Табл. 4.2 надає інформацію про розподіл населення агломерації в залежності від адміністративного району.

Таблиця 4.2 – Розподіл населення агломерації Дніпро відповідно до індексів забруднення повітря

Район	КІЗА <5	КІЗА 5–10	КІЗА 10–15	КІЗА >15	Площа, м. кв.	Населення території
Центральний	6569	48533	4890	0	10615451	59993
Чечеловський	2364	19065	82709	11503	39320433	115641
Індустріальний	0	96331	30996	0	38164621	127327
Шевченківський	0	53079	70127	20311	48910414	143517
Соборний	15725	96433	52827	2325	45364850	167311
Амур- Нижньодніпро- вський	0	31441	114672	0	75252654	146113
Новокодацький	0	609	155794	7951	117827007	164354
Самарський	0	36269	35833	0	74825283	72102
м. Дніпро	13798	31511 4	629492	37954	450280713	996358

На рис. 4.16 зображено просторовий розподіл КІЗА на території агломерації, визначений за даними мобільного посту EOL. Кольорова шкала демонструє рівні забруднення: від найнижчих значень (<5) у світло-зелених зонах до найвищих (>20) у темно-червоних. Найбільш забрудненими виявилися райони в центральній, південній та південно-західній частинах міста, що свідчить про інтенсивний антропогенний вплив. Менш забруднені зони переважно розташовані на околицях міста. На карті також позначено житлові забудови, межі районів і точки замірів, що дозволяє простежити зв'язок між щільністю населення та рівнем забруднення повітря.

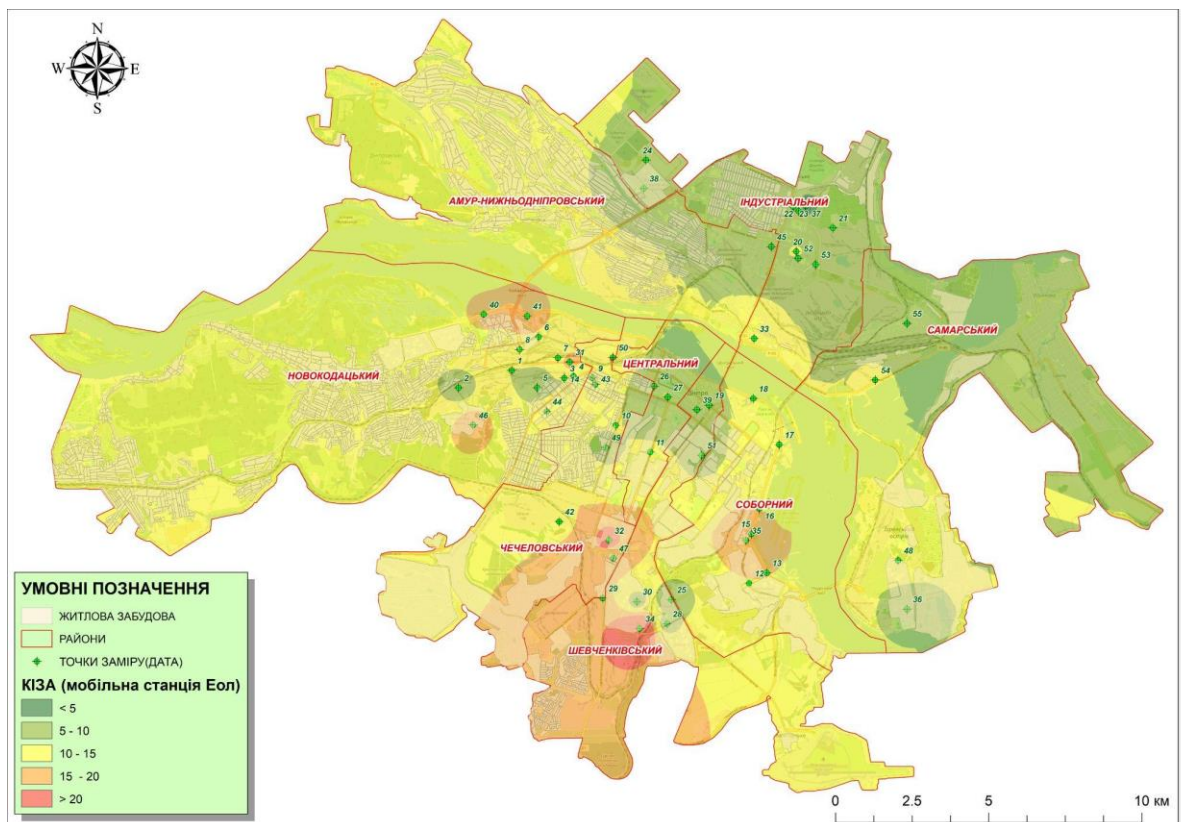


Рисунок 4.16 – Комплексний індекс забруднення атмосфери від посту EOL

Рис. 4.17 та 4.18 ілюструють результати моніторингу концентрацій дрібнодисперсного пилу $PM_{2.5}$, виконаного за допомогою мобільного поста EOL. Рис. 4.17 показує фрагмент таблиці з кількісними даними по 24 блоках, розташованих у різних районах міста, із зазначенням мінімальних, максимальних і середніх значень концентрацій $PM_{2.5}$, площі блоків та відповідного рівня забруднення. Найвищі середні концентрації зафіксовані в Амур-Нижньодніпровському та Шевченківському районах, що свідчить про підвищене антропогенне навантаження.

На рис. 4.18 візуалізовано просторовий розподіл концентрацій $PM_{2.5}$. Картографічна візуалізація чітко демонструє осередки забруднення – насичені червоні й жовті ділянки зосереджені переважно в центральних, промислових і транспортно-навантажених районах. Зелені зони, що переважають на околицях, свідчать про нижчі концентрації $PM_{2.5}$, характерні для менш урбанізованих територій. Поєднання табличних та картографічних даних

дозволяє глибше проаналізувати закономірності просторового розподілу забруднення повітря в межах агломерації.

Номер блоку	Район	Площа, м кв.	Мінімальне	Максимальне	Середнє	Рівень
1	Новокодацький	390100	18,9	22,3	20,4	
2	Новокодацький	404300	19,0	27,8	22,9	
3	Соборний	87500	17,9	21,4	19,5	
4	Амур-Нижньодніпровський	162400	28,9	34,5	31,8	
5	Амур-Нижньодніпровський	139200	33,1	35,5	34,3	
6	Амур-Нижньодніпровський	8300	35,7	36,0	35,9	
7	Шевченківський	10400	20,4	20,5	20,5	
8	Шевченківський	212600	20,8	21,6	21,2	
9	Соборний	263800	11,6	16,5	15,2	
10	Соборний	259300	11,5	16,5	15,2	
11	Соборний	196000	11,5	16,0	14,4	
12	Соборний	1027500	16,2	18,0	17,2	
13	Чечеловський	2847700	16,5	20,9	19,0	
14	Самарський	620000	20,1	23,1	21,1	
15	Соборний	36100	21,2	22,6	22,1	
16	Індустріальний	677600	34,8	57,7	40,1	
17	Індустріальний	58700	20,1	21,2	20,7	
18	Соборний	7800	20,8	22,2	21,4	
19	Соборний	31800	19,5	20,7	20,1	
20	Соборний	24400	20,0	20,9	20,5	
21	Новокодацький	17700	19,7	21,8	20,5	
22	Новокодацький	16100	27,1	30,9	29,0	
23	Новокодацький	11300	26,4	30,6	28,5	
24	Новокодацький	17100	14,1	17,0	16,0	

Рисунок 4.17 – Фрагмент таблиці з даними поста ЕОЛ (вимірювання концентрацій PM2.5)

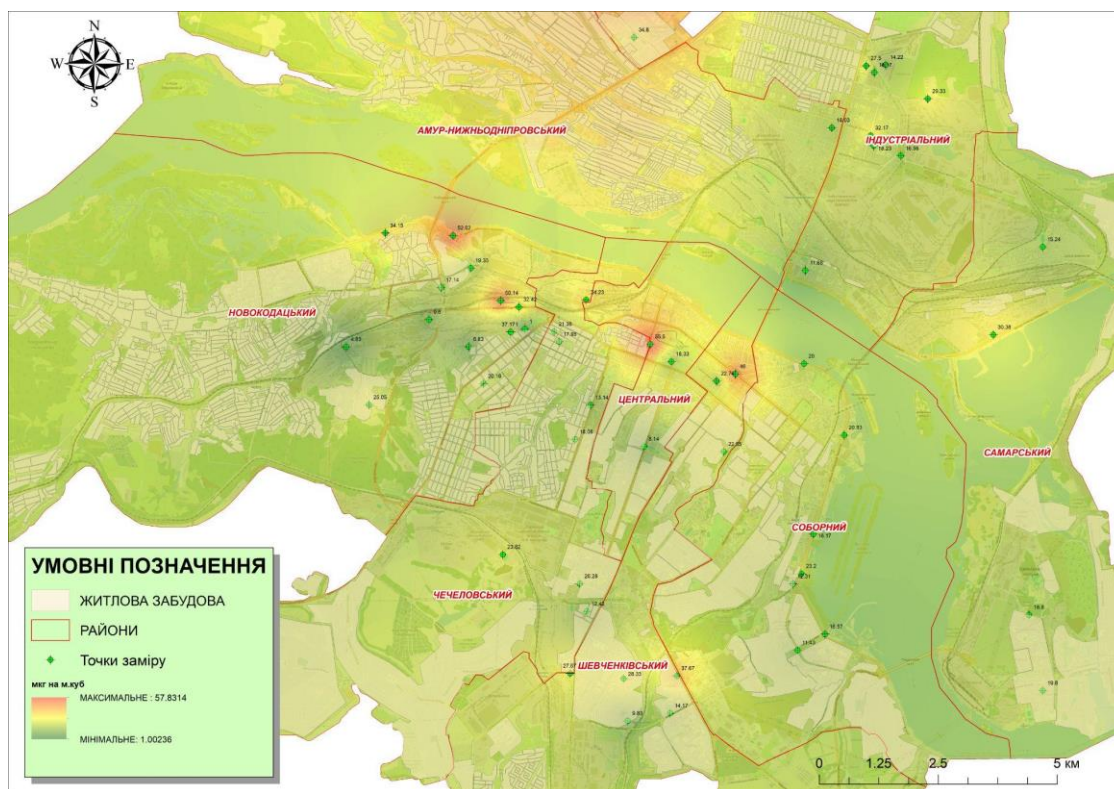


Рисунок 4.18 – Карта позначень вимірювання концентрацій PM2.5 станцією ЕОЛ

4.4. Обґрунтування переліку устаткування для постів спостереження

Моніторинг атмосферного повітря повинен будуватися на широкому спектрі сучасних датчиків для вимірювання концентрацій різних забруднюючих речовин. Такі датчики поділяються на дві основні категорії: датчики твердих часток (пилу) та газові датчики. Кожен тип має свої моделі з різними характеристиками – діапазоном вимірювання, принципом дії, точністю та вартістю.

Датчики твердих часток (PM2.5/PM10). Найпоширенішими є оптичні лазерні датчики, що визначають концентрацію пилу за розсіянням лазерного променя на частинках. Прикладами є Nova Fitness SDS011 та серія (рис. 4.19) Plantower PMS (PMS5003, PMS7003) (рис. 4.20). Вони вимірюють дрібнодисперсні фракції PM2.5 і PM10 (частки розміром до 2.5 і 10 мкм відповідно) в діапазоні приблизно 0–500 $\mu\text{г}/\text{м}^3$ з відносною похибкою близько 10% [143, 144].

Такі датчики забезпечують оновлення даних щосекунди і мають вбудований вентилятор для прокачування повітря через вимірювальну камеру. Їх точність достатня для індикації динаміки концентрацій, хоча для досягнення реальної точності потребують калібрування.

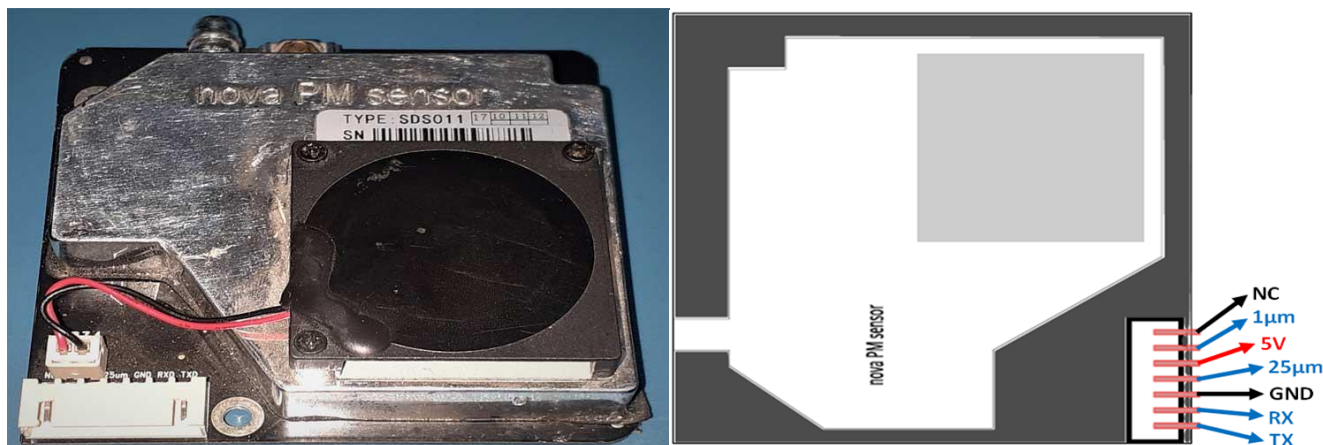


Рисунок 4.19 – Датчик оцінки концентрації пилу Nova Fitness SDS011



Рисунок 4.20 – Датчик концентрації пилу PM 2.5 Plantower PMS

Наприклад, PMS5003 коштує близько \$15, а SDS011 – близько \$30

Інші оптичні сенсори, такі як Sharp GP2Y1010AU0F (інфрачервоний нефелометричний датчик пилу), ще дешевші (~\$10), але мають нижчу чутливість і потребують врахування впливу вологості. Новітні високоточні сенсори, як-от Sensirion SPS30, забезпечують кращу стабільність і ресурс >10 років, із точністю $\sim \pm 10\%$ по масовій концентрації, хоча їх ціна вища (близько \$40–\$50). У цілому, сучасні лазерні датчики пилу розширили можливості моніторингу, дозволяючи отримувати локальні дані PM 2.5/PM 10 з прийнятною точністю за мінімальну вартість у порівнянні з референтними аналізаторами (вартістю >\$10 000).

Газові датчики. Для вимірювання концентрацій газоподібних забруднюючих речовин (таких як CO, NO₂, O₃, SO₂, CO₂, леткі органічні сполуки тощо) пропонуємо застосовувати різні технології датчиків: електрохімічні, напівпровідникові (оксидно-резистивні) та інфрачервоні. Електрохімічні датчики містять мініатюрні гальванічні комірки, що генерують електричний сигнал при хімічній реакції з цільовим газом. Вони характеризуються відносно високою вибірковістю та чутливістю, але потребують періодичного калібрування і мають обмежений термін служби

(~1–2 роки). Прикладами є серія Alphasense B4 – такі сенсори коштують близько \$50 за штуку і застосовуються в дослідницьких мультисенсорних постх (рис. 4.21). Їх типова точність після калібрування – порядку $\pm 15\%$ від вимірної концентрації, з лінійністю у робочому діапазоні [145].



Рисунок 4.21 – Сенсор для вимірювання оксиду вуглецю (CO) Alphasense B4

Металоксидні напівпровідникові датчики (MO_x), такі як MiCS–2710 чи комбінований MiCS–4514 (двоелементний сенсор для CO та NO_2), діють за рахунок зміни опору нагрітого напівпровідника при адсорбції газів. Вони дешевші (наприклад, NO_2 MO_x сенсор MiCS–2710 коштує лише ~\$7, а комбінований CO/ NO_2 – ~\$20) та довговічніші, але менш точні і схильні до перехресної чутливості (різні гази та вологість впливають на результати). MO_x -датчики зазвичай використовуються для індикативного моніторингу або оцінки сумарних показників якості повітря (наприклад, сенсор MQ–135 реагує на сумарні леткі органічні речовини і дає інтегральний індекс «VOC»). Їх точність невисока (похибка може перевищувати 20–30% без калібрування), проте вони корисні для детектування тенденцій (підвищення/зниження концентрацій). Для вимірювання вуглекислого газу (CO_2) найчастіше застосовують NDIR (неінфрачервоне оптичне) сенсори – наприклад, MH–Z19, SenseAir S8 – з діапазоном 0–5000 ppm і похибкою ~50 ppm або $\pm 5\%$ (що

достатньо для контролю накопичення CO₂). Ціна таких датчиків CO₂ становить ~\$30–\$80 залежно від моделі. Варто зазначити, що один пост моніторингу якості повітря зазвичай включає набір з кількох газових сенсорів для різних речовин, оскільки кожен датчик селективний до свого газу. Наприклад, для охоплення основних забруднюючих речовин міського повітря – оксиду вуглецю, двооксиду азоту та озону – можуть використовуватися відповідно датчики MQ–7 або електрохімічний CO, MO_x або електрохімічний NO₂–сенсор, та електрохімічний O₃–сенсор. У сукупності, сучасні сенсори дозволяють вимірювати практично всі ключові інгредієнти смогу: дрібний пил (PM_{2.5}/PM₁₀), NO₂, O₃, CO, SO₂, леткі органічні сполуки та CO₂. Далі наведено приклади популярних датчиків та їх основні характеристики (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Приклади популярних датчиків та їх основні характеристики

Модель датчика	Вимірювані показники	Принцип дії	Точність	Орієнтовна ціна
Nova SDS011	PM2.5, PM10	Лазерний лічильник часток	±10%	~\$30
Plantower PMS5003	PM1, PM2.5, PM10	Лазерний лічильник часток	±10 µг/м ³	~\$15
Sharp GP2Y1010AU0F	PM2.5	ІЧ–нефелометричний	±20%	~\$10
MiCS–4514 (SGX)	CO, NO ₂	Напівпровідниковий (MO _x)	Індикативна	~\$20
Alphasense NO ₂ –B4	NO ₂	Електрохімічний	±15%	~\$50
Alphasense O ₃ –B4	O ₃	Електрохімічний	±15%	~\$50
Bosch BME680	VOC, T, RH	MO _x	Індикатор IAQ	~\$15
Hanwei MQ–7	CO	Напівпровідниковий (MO _x)	±25%	~\$5

Сучасний пост моніторингу атмосферного повітря будується за модульним принципом, включаючи сенсорні модулі, обчислювальний блок, засоби зв'язку та живлення, змонтовані в захищеному корпусі. На рис. 4.22. показано типовий приклад апаратної схеми такого поста із використанням мікроконтролера Arduino та набору датчиків.

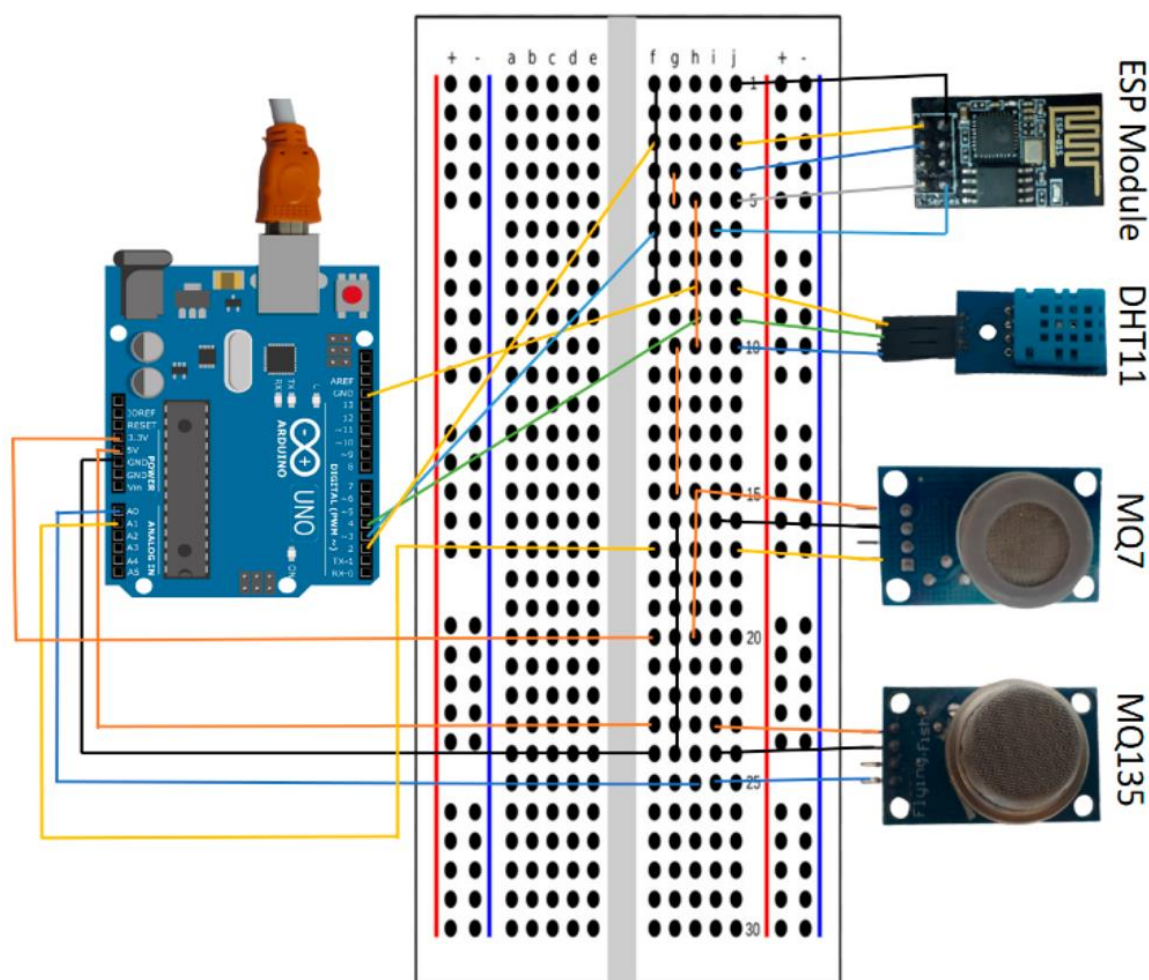


Рисунок 4.22 – Приклад апаратної схеми компактного поста моніторингу (Arduino Uno з підключеними модулями: WiFi (ESP8266), датчик температури та вологості DHT11, датчик CO MQ–7 та універсальний газовий датчик MQ–135).

Датчики з'єднані на макетній платі, передаючи дані на мікроконтролер, який надсилає їх через Wi-Fi на сервер. В цьому прикладі, основним компонентом є мікроконтролер або вбудований комп'ютер. Він є «мозком»

поста, зчитує покази з датчиків та передає їх далі. Найчастіше використовують мікроконтролери на кшталт Arduino, ESP32 або STM32 для простих бюджетних станцій, або одноплатні комп'ютери (Raspberry Pi, BeagleBone) для більш складних систем. Мікроконтролер має достатню кількість аналогових та цифрових входів для підключення всіх датчиків, а також модулі зв'язку (наприклад, Wi-Fi або стільниковий модем). У прикладі (рис. 4.22) використано Arduino Uno з додатковим модулем ESP8266 для Wi-Fi.

Набір датчиків якості повітря. В склад поста входять сенсори, підібрані під цілі моніторингу. Мінімально – датчик дрібних часток (PM2.5/PM10) та один чи кілька газових датчиків. Як правило, контролюються найкритичніші для міста забруднюючі речовини: тверді частинки (пил), CO, NO₂, O₃, можливо SO₂ та загальні VOC. Датчики розміщуються так, щоб забезпечити контакт з навколишнім повітрям – найчастіше всередині корпуса з отворами або на зовнішній панелі приладу під захисним екраном від опадів. Важливо передбачити вентиляцію: деякі конструкції містять міні-вентилятори для активного протягування повітря через сенсори (це покращує швидкість відгуку та повторюваність вимірів).

Зліва, показано відкритий металевий шафований корпус, всередині якого встановлено:

- дві плати з мікроконтролерами (наприклад, Raspberry Pi чи аналогічні SBC);
- проведено акуратне кабельне підключення (живлення, передача даних, сенсори);
- присутні комунікаційні модулі (можливо, Wi-Fi або LTE для передачі даних у мережу).

Справа зображено чотири сучасні сенсори з підписами щодо того, яку речовину кожен із них вимірює:

- SO₂ (діоксид сірки) – Alphasense SO₂-B4 (Електрохімічний сенсор для моніторингу концентрації діоксиду сірки в повітрі);

- CO (чадний газ) – MiCS–4514 (Двоканальний сенсор для вимірювання рівня CO та NO₂, у схемі використовується для чадного газу);
- O₃ (озон) – Alphasense O₃–B4 (високоточний сенсор для моніторингу рівня озону);
- VOC (леткі органічні сполуки) – Hanwei MQ–7 (напівпровідниковий сенсор для детекції оксиду вуглецю та загальної кількості летких органічних сполук).

Комунікаційний модуль. Для передачі зібраних даних на центральний сервер або хмарну платформу використовуються бездротові технології. Найпростіший варіант – модуль Wi-Fi, якщо є доступна мережа; він дозволяє надсилати дані у реальному часі до інтернет-сервісу (наприклад, через HTTP/MQTT протоколи). В умовах міста більш надійними можуть бути модулі стільникового зв'язку (GPRS/3G/4G або сучасні NB-IoT/LTE-M модеми), що дає змогу постам спостереження автономно підключатися до мережі – інтернет через мобільну мережу. Також набувають популярності довгострокові мережі малого радіусу (LPWAN) – зокрема, LoRaWAN – для об'єднання десятків датчиків по місту в єдину бездротову мережу з великою дальністю та низьким енергоспоживанням.

Вибір технології залежить від інфраструктури: якщо в місті вже розгорнута мережа LoRaWAN або є стабільний стільниковий зв'язок, пости можуть використовувати їх для надійної передачі інформації на сервер. Усі сучасні датчики легко інтегруються з мікроконтролерами і підтримують бездротову передачу даних, що робить їх придатними для розподіленої мережі.

Порівняльний аналіз методів передачі даних для забезпечення ефективної технології прийняття рішень щодо доцільності використання конкретного методу передачі в залежності від їхніх переваг, опису та способу підключення або їх комбінування у разі необхідності наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняльний аналіз методів передачі даних

Метод передачі даних	Опис	Переваги	Спосіб підключення
LoRaWAN	Енергоефективний протокол для великої кількості розподілених сенсорів із широкою площею покриття	Низьке енергоспоживання, велика дальність зв'язку, підтримка великої кількості пристроїв	Через шлюзи LoRaWAN, підключені до мережі Інтернет або мобільного зв'язку
NB-IoT	Спеціалізована технологія для підключення пристроїв у міських та промислових умовах із низькими витратами енергії	Висока проникність сигналу, підтримка великої кількості пристроїв, низьке енергоспоживання	Використання мобільних операторів з NB-IoT покриттям
GSM/3G/4G LTE	Класичний мобільний зв'язок, що забезпечує оперативну передачу даних у регіонах з покриттям	Швидка передача даних, глобальне покриття, надійність зв'язку	SIM-карта в модулі передавання даних
Wi-Fi та Інтернет	Використовується у випадках наявності стабільної мережевої інфраструктури	Висока швидкість передачі даних, стабільне з'єднання, відсутність витрат на мобільний зв'язок	Підключення через локальну мережу або провідне Інтернет-з'єднання

Для забезпечення ефективного функціонування системи передбачено багаторівневу модель передачі інформації. Кожен пост оснащений спеціальним передавачем, що передає дані до центрального сервера за допомогою бездротових або дротових комунікаційних каналів. Вибір конкретного методу залежить від специфіки розміщення поста та необхідної швидкості оновлення інформації.

Основні методи передачі:

- LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) – енергоефективний протокол для великої кількості розподілених сенсорів із широкою площею покриття.
- NB-IoT (Narrowband IoT) – спеціалізована технологія для підключення пристроїв у міських та промислових умовах із низькими витратами енергії.
- GSM/3G/4G LTE – класичний мобільний зв'язок, що забезпечує оперативну передачу даних у регіонах з покриттям.
- Wi-Fi та Ethernet – застосовується у випадках наявності стабільної мережевої інфраструктури.

Блок живлення. Пост повинен працювати довготривало і автономно. Якщо є доступ до електромережі, використовується адаптер живлення (5В USB або 12В зі знижуючим перетворювачем). В автономних точках застосовуються сонячні батареї з акумуляторами, які забезпечують безперебійну роботу. Низьке енергоспоживання сенсорів та контролера (часто загальне споживання <1–2 Вт) дозволяє жити систему від невеликої сонячної панелі (20–50 Вт) з акумулятором на кілька десятків ват–годин, що заряджається вдень. Блок живлення також включає стабілізатори напруги та захист від перенапруг, особливо важливо для встановлень на відкритому повітрі.

Корпус та монтаж. Усі компоненти розміщуються в погодостійкому корпусі (наприклад, спеціальному боксі з класом захисту IP65), щоб захистити електроніку від дощу, пилу і прямих сонячних променів. Корпус часто білого або світлого кольору з вентиляційними отворами, інколи з активним

вентилятором та фільтрами від комах/пилу. Для запобігання нагріву всередині може використовуватися екранування від сонця (сонячний козирок). Пост монтується на висоті ~2–3 метри над землею (наприклад, на стовпі, стіні будівлі чи окремій щоглі) – згідно з стандартними вимогами до постів моніторингу, щоб покази відображали концентрацію в зоні дихання людей і не були спотворені приземним шаром чи випадковими перешкодами.

Модуль зберігання та обробки даних. Деякі вдосконалені пости можуть мати локальну пам'ять (SD-карту чи флеш) для буферизації даних при втраті зв'язку або для локального зберігання первинних даних. Крім того, може працювати вбудоване програмне забезпечення для попередньої обробки: усереднення значень за хвилину/годину, фільтрація шумів, базова калібровка (наприклад, корекція нуля газових сенсорів за допомогою періодичного продування чистим повітрям або компенсація впливу температури/вологості на покази сенсорів). В сучасних концепціях edge-computing частина обчислень виконується прямо на пристрої: це зменшує обсяг переданих даних і підвищує стійкість системи.

Наприклад, пост може самостійно визначати перевищення порогів концентрацій забруднюючих речовин у повітрі і надсилати лише тривожні повідомлення або агреговані дані, сформовані за певний період часу. Це дозволяє значно зменшити обсяг переданої інформації, оптимізувати використання каналу зв'язку та підвищити ефективність реагування системи у разі виявлення потенційної загрози.

У результаті типовий пост моніторингу – це IoT-вузол, що виконує одночасно кілька функцій: вимірює основні параметри якості повітря, проводить попередню обробку даних (усереднення, фільтрація, корекція), а також передає отримані результати на централізований сервер чи у хмарне середовище. Сучасні технології дають змогу зібрати подібний пристрій відносно просто і з використанням доступних технічних модулів, зокрема завдяки поширенню мікроконтролерів і відкритих платформ для роботи з сенсорами.

Важливим етапом є також калібровка та верифікація приладу: після його складання станцію бажано на певний час розмістити поруч зі стандартизованим аналізатором (або хоча б з перевіреними сенсорами) для звірення отриманих даних і розрахунку коригувальних коефіцієнтів. Це дозволить суттєво підвищити точність показів і загальну достовірність даних, зібраних мережею недорогих постів. На рис. 4.23 представлено алгоритм технічного оснащення поста моніторингу та ключові етапи його конфігурації.

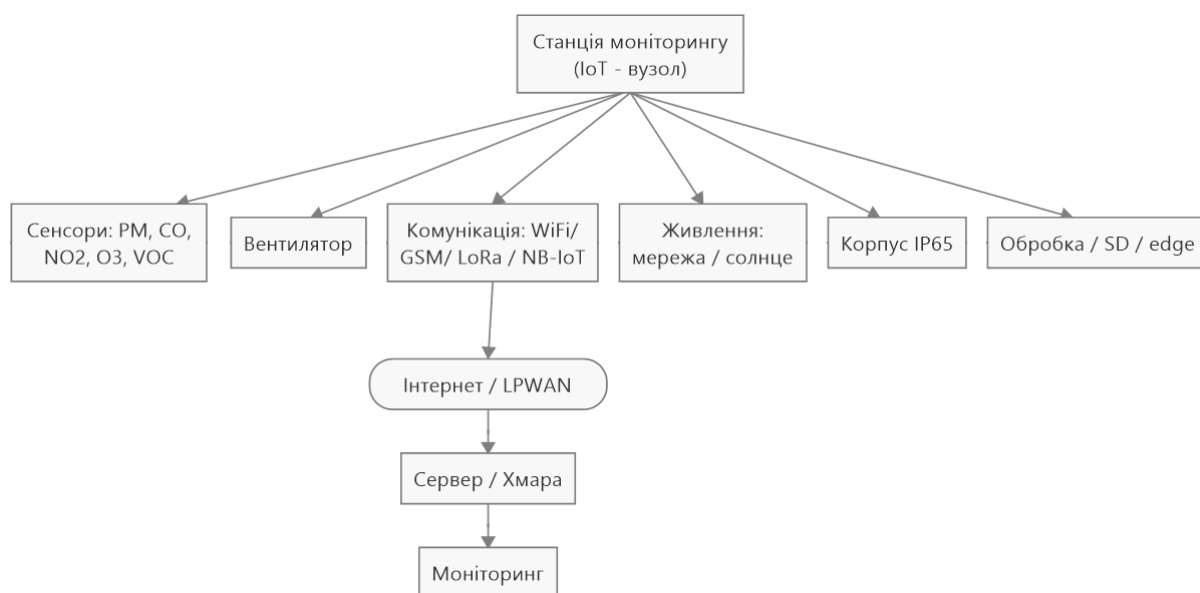


Рисунок 4.23 – Компоновка та схема функціонування посту моніторингу

Для оцінки ефективності різних рішень корисно порівняти не лише окремі сенсори, а й цілі системи моніторингу – від саморобних станцій до комерційних продуктів і референтних постів. Нижче у табл. 4.5 наведено порівняння декількох сучасних систем/приладів для моніторингу якості повітря, що можуть бути використані у міському середовищі.

З наведеної таблиці видно компроміс між вартістю та можливостями: низьковартісні сенсори (на кшталт PurpleAir, AirBeam) дають лише базову інформацію (переважно по твердих частках) з помірною точністю, зате їх можна розгорнути у великій кількості. Дорожчі комплексні системи (AirSensEUR, Aeroqual) охоплюють більше параметрів і забезпечують кращу

якість даних, але їх бюджет обмежує щільність мережі. Таким чином, вибір компонентів для поста залежить від поставлених задач і наявних ресурсів: іноді доцільно поєднувати різні рівні – встановити кілька високоточних модулів для калібрування і контрольної перевірки, доповнивши їх десятками простих сенсорів по всьому місту [146].

Таблиця 4.5 – Порівняння сучасних систем/приладів для моніторингу повітря

Система/ прилад	Контрольовані показники	Використані технології	Спосіб передачі даних	Орієнтована вартість
Sensor.Community (Luftdaten DIY)	PM2.5, PM10; температура, вологість (опційно)	Лазерний оптичний датчик пилу (напр. SDS011); цифровий датчик температури/воло гості	Wi-Fi (бездротове підключення до інтернету)	~\$50 (низька, комплект деталей)
PurpleAir PA-II	PM1, PM2.5, PM10; температура, відносна вологість, атмосферний тиск	Два лазерні лічильники часток та комбінований сенсор температури/воло гості/тиску (BME280), вбудований Wi-Fi модуль	Wi-Fi (2.4 ГГц, передача даних на хмарний сервіс)	~ \$200–300
Airly sensors	PM1, PM2.5, PM10; декілька газових показників (наприклад, NO ₂ , O ₃ , CO або SO ₂ – залежно від комплектації); температура, вологість, тиск	Лазерний лічильник часток (оптичний датчик для PM); електрохімічні сенсори для газів (2 слоти під газові сенсори); цифрові сенсори температури/воло ги/тиску	Мобільний зв'язок (вбудований GSM-модуль для передачі даних на платформу Airly)	~\$1000

Система/ прилад	Контрольовані показники	Використані технології	Спосіб передачі даних	Орієнтована вартість
Clarity Node-S	PM1, PM2.5, PM10; NO ₂ (базово); <i>можливість розширення</i> (модулі для O ₃ , CO ₂ , CO тощо); температура, вологість, тиск	Лазерний лічильник часток (датчик PMS5003) ; електрохімічний сенсор NO ₂ ; додаткові модулі сенсорів за потреби; сонячна панель і акумулятор для автономної роботи	Мобільний зв'язок (глобальний стільниковий зв'язок через вбудовану SIM); дані в хмарний сервіс Clarity	~\$1200 (близько \$1000–1300 за пристрій)
AQMesh	NO _x (NO/NO ₂), O ₃ , CO, SO ₂ , H ₂ S (+ CO ₂); PM1, PM2.5, PM10; температура, вологість, тиск; шум; <i>опція:</i> швидкість/напря м вітру	Електрохімічні сенсори для газів (останнього покоління); NDIR–датчик для CO ₂ ; світлорозсіюваль ний оптичний лічильник частинок для PM; мікрофон (шумометр); опційний датчик вітру	Бездротовий зв'язок: мобільний (GPRS/3G) та інші опції бездротового підключення; дані передаються у хмарний веб–додаток в реальному часі	~\$8000 (висока вартість, професійна система)
ENVEA Cairnet V3	До 6 газових показників (O ₃ , NO ₂ , CO, SO ₂ , H ₂ S/CH ₄ S, NH ₃ , VOC тощо) одночасно; PM10, PM2.5, PM1, вологість, тиск	Електрохімічні мікродатчики <i>Cairsens</i> ; лазерний оптичний датчик пилу; цифрові датчики метеопараметри; герметичний погодостійкий пост	Мобільний інтернет (передача даних на сервер <i>Caircloud</i> ; слот microSD для локального зберігання)	~\$5,000– 10,000 (залежно від конфігураці ї)

Таким чином, технічне забезпечення посту спостереження складається із багатьох модулів та датчиків. Схема представлена на рис. 4.24.

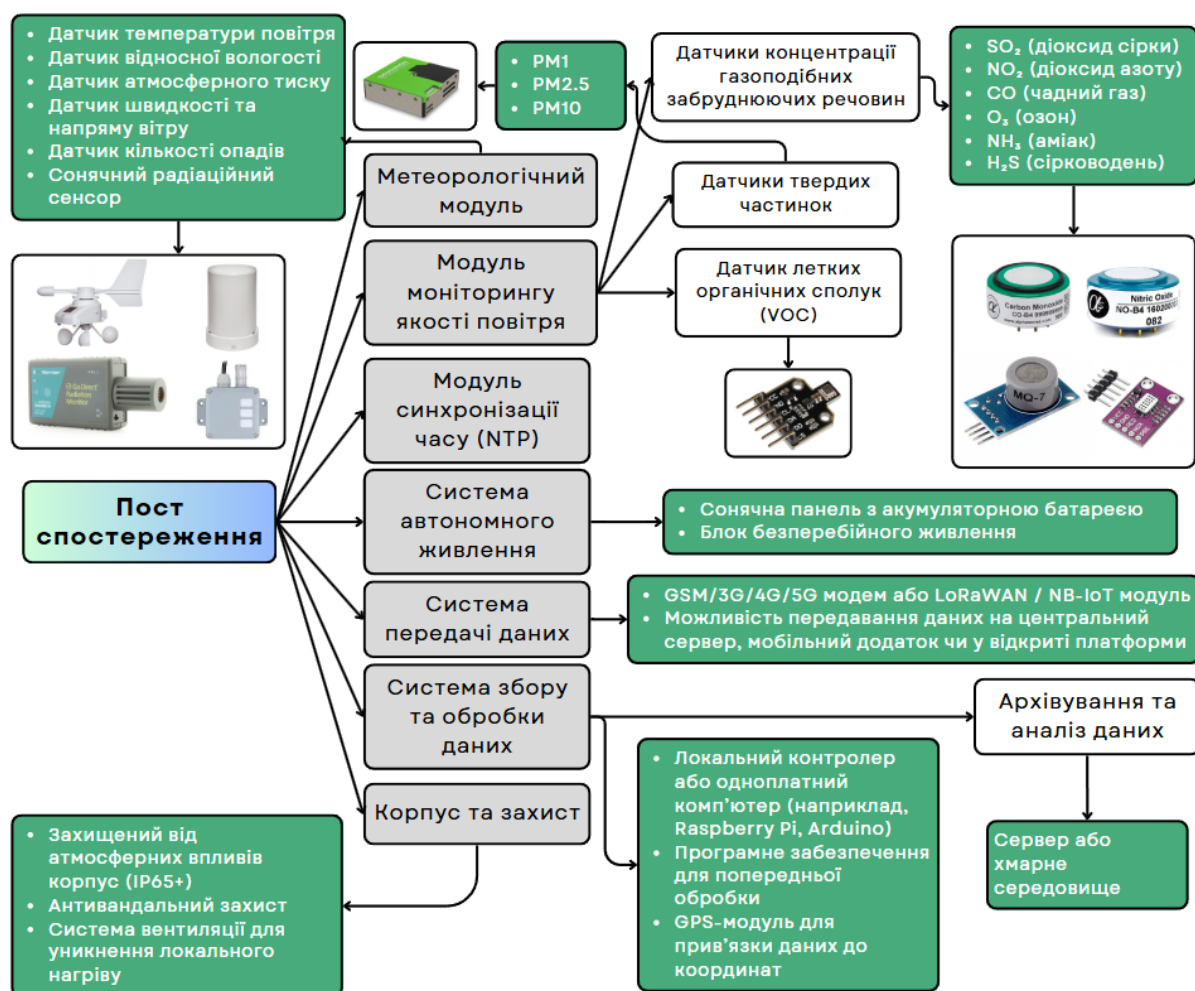


Рисунок 4.24 – Технічне забезпечення посту спостереження

4.5. Реалізація моніторингу якості атмосферного повітря на основі використання аерокopterів з додатковим обладнанням – газоаналізаторами

Згідно з технологією розгортання ефективної системи моніторингу на локальному та регіональному рівнях, пропонується використання аерокopterів із сучасним обладнанням – газоаналізатором, для використання їх у місцях, де відсутні стаціонарні пости спостереження за повітрям, а також при надзвичайних ситуаціях, в тому числі що викликані воєнними діями.

Наприклад, на полігонах твердих відходів часто відбувається тління або займання сміття з утворенням диму та газів (метан, леткі органічні сполуки тощо). Безпілотник із газоаналізатором дозволяє оперативно оцінити рівень забруднення довкола такого осередку, проводячи вимірювання концентрації забруднюючих речовин у повітрі. Так само у випадку промислової аварії чи надзвичайної ситуації, пов'язаної з викидом токсичних газів, аерокopter здатен без зволікання здійснити заміри безпосередньо в небезпечній зоні. Це дає аварійно-рятувальним службам критично важливу інформацію про рівні отруйних речовин для прийняття рішень щодо евакуації населення чи ліквідації наслідків. Дані аерокoptери доповнюють традиційні системи моніторингу, забезпечуючи гнучкість, мобільність і швидкість реагування, особливо там, де стаціонарні пости відсутні або не можуть діяти через небезпеку або інші обставини.

Також, використання дронів дозволяє наближатися до джерел викидів, таких як заводські труби, і вимірювати концентрації забруднюючих речовин безпосередньо у шлейфі, недосяжному для наземних станцій. Такий підхід забезпечує побудову тривимірних карт розподілу забруднення – визначення концентрацій не лише по горизонталі, а й за висотою – що неможливо отримати зі стаціонарних постів. Система Sniffer4D, встановлена на цьому дроні, здатна одночасно відстежувати до 9 різних параметрів повітря, передаючи дані в реальному часі для подальшого аналізу.

Дрони мають низку переваг над класичними стаціонарними (або навіть пересувними наземними) постами моніторингу. Передусім, це мобільність: сенсори на борту безпілотника можна швидко доставити в потрібну точку простору, тоді як стаціонарний пост контролює лише місце свого розташування. Це особливо важливо для виявлення локальних джерел забруднення – дрон може підлетіти безпосередньо до об'єкта (наприклад, до труби, з якої йде викид) і відібрати проби повітря на джерелах викидів. По-друге, дрони забезпечують оперативність спостережень: розгортання такої системи займає лічені хвилини, отже можна відразу отримати дані про стан

повітря під час надзвичайної ситуації (пожежі, хімічного викиду тощо), не чекаючи на планове оновлення показників стаціонарних постів. Важливо й те, що безпілотний моніторинг знижує ризики для персоналу: дрон може безпечно працювати у небезпечній зоні (зоні задимлення, токсичної хмари тощо), тоді як людина-оператор перебуває поза межами впливу. За рахунок цього значно підвищується безпека та ефективність роботи екологічних служб. Ще одна перевага – гнучкість та масштабованість системи: один дрон може послідовно обстежити кілька точок або маршрут, формуючи деталізовану картину забруднення, яку інакше потребувало б встановлення цілої мережі постів. У сукупності ці фактори роблять дрони надзвичайно привабливим інструментом для моніторингу, доповнюючи і розширюючи його можливості.

Ключовим елементом описаної технології є система Sniffer4D – компактний багатоканальний газоаналізатор, спеціально розроблений для застосування на рухомих платформах (дронах, наземних роботах тощо). Вона складається з апаратної частини (датчикового модуля) і програмного забезпечення для аналізу. Sniffer4D здатна одночасно вимірювати до дев'яти параметрів якості повітря. Модульна конструкція дозволяє підібрати необхідний набір датчиків під конкретні завдання: всередині базового блока можна встановити до 8 різних сенсорних модулів. Доступні сенсори охоплюють більшість поширених забруднюючих речовин: зокрема, модулі для вимірювання твердих частинок (PM1.0, PM2.5, PM10), оксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO₂), озону (O₃), діоксиду сірки (SO₂), сірководню (H₂S), аміаку (NH₃), хлору (Cl₂), хлористого водню (HCl), фосфіну (PH₃) та летких органічних сполук (TVOC). Для моніторингу парникових та горючих газів доступні інфрачервоні модулі на вуглекислий газ (CO₂) і метан/вуглеводні (CH₄/гранично допустима вибухонебезпечна концентрація). Окремий сенсор вимірює запах в умовних одиницях (Odor, OU), що важливо при оцінці дискомфортних запахів від полігонів, виробництв тощо. Додатково система може оснащуватися метеомодулем (датчики швидкості і напрямку вітру) та

навіть дозиметром для контролю радіаційного фону – усе це в одному компактному приладі масою ~0,3 кг.

Зібрані показники прив'язуються до координат GPS і передаються на землю в режимі реального часу завдяки телеметричному каналу. Спеціалізоване програмне забезпечення Sniffer4D Mapper (працює на ПК під Windows або Android-планшеті) приймає ці дані, будує на екрані карти концентрацій та графіки й автоматично зберігає всі вимірювання для подальшого аналізу.

Інтерфейс дозволяє відображати інформацію від кількох дронів одночасно, що корисно при масштабних дослідженнях. Крім того, результати можуть автоматично передаватися до хмарного сервера або бази даних для централізованого моніторингу.

Переваги комплексу Sniffer4D підтверджуються його успішним застосуванням у різних країнах світу. Наприклад, у Коста-Риці дослідники використали дрон з системою Sniffer4D для спостереження за викидами діючого вулкана: апарат здійснив політ у кратер вулкану Турріальба і виміряв концентрації SO₂, CO₂, CO, NO₂, H₂S, HF, а також рівні дрібнодисперсного пилу (PM1/2.5/10) та інших газів [147].

Це дозволяє своєчасно отримувати критично важливі дані про стан атмосферного повітря і оперативно реагувати на екологічні загрози, особливо в небезпечних умовах, а доступ людини до місця події обмежений.

Таким чином, технологічний алгоритм роботи включає в себе різні етапи (рис. 4.25). Технологічна схема використання безпілотного літального апарату DJI Matrice у поєднанні з газоаналізатором Sniffer4D складається з п'яти основних етапів: підготовка, налаштування місії, виконання польоту, завершення місії та звітування з обслуговуванням. Ці етапи відображають послідовну логіку дій оператора від моменту запуску системи до аналізу та збереження результатів моніторингу.

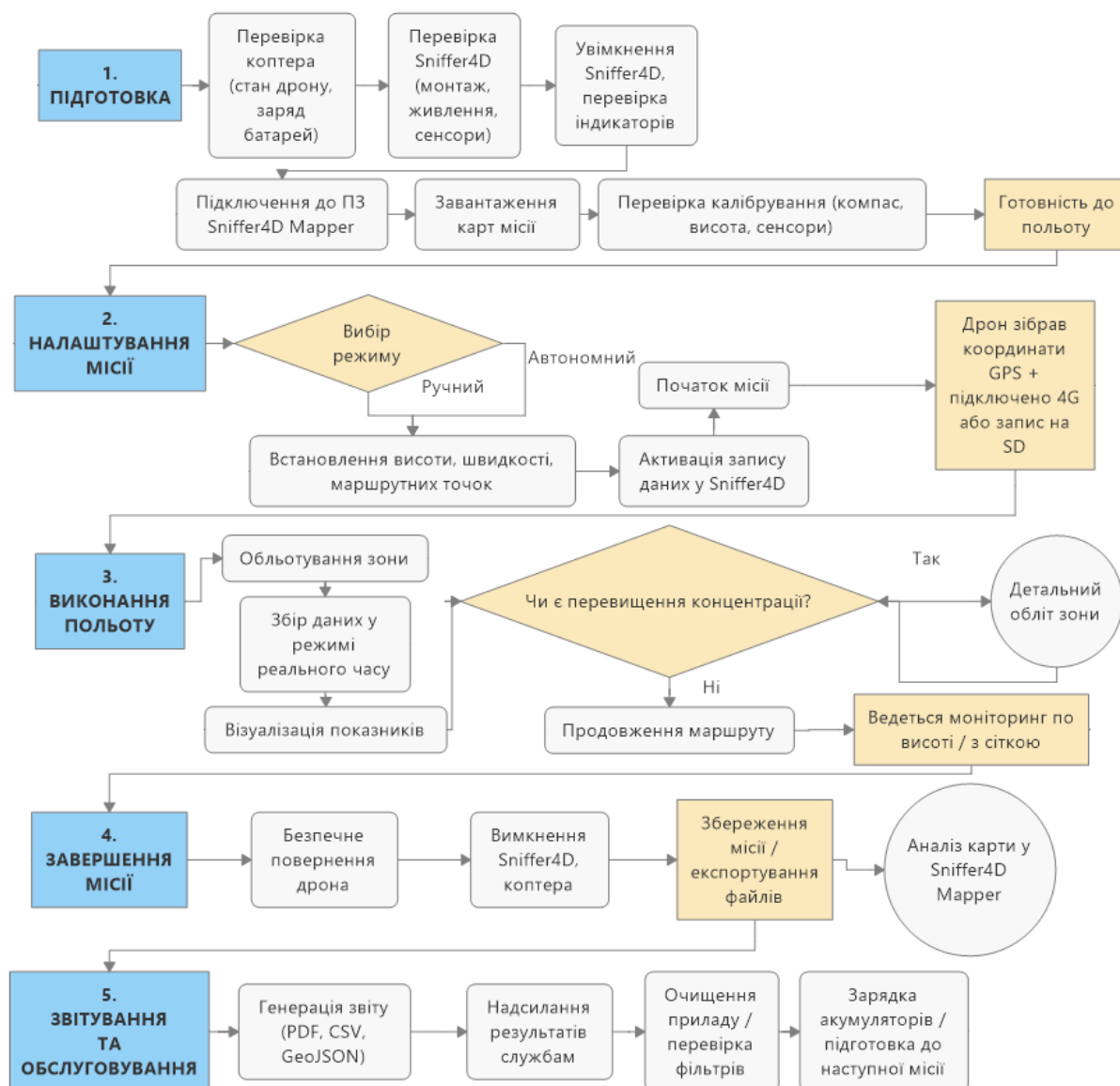


Рисунок 4.25 – Технологічний алгоритм використання аерокоптеру для моніторингу атмосферного повітря

Перший етап – підготовка. Він включає перевірку технічного стану дрона: акумуляторів, пропелерів, стану корпусу та працездатності електроніки. Далі оператор виконує встановлення газоаналізатора Sniffer4D на платформу дрона та підключає живлення. Після цього пристрій вмикається, перевіряється світлова індикація, що сигналізує про справність сенсорів, наявність сигналу GPS, наявність SD-карти та готовність до передачі даних. Паралельно запускається програмне забезпечення Sniffer4D Mapper на ноутбучі або планшеті. Якщо передбачається автономний політ, завантажуються карти місцевості. Усі сенсори калібруються за потреби,

зокрема перевіряється компас, висотомір та можливі збої у показниках. Після завершення цього етапу система вважається готовою до виконання місії.

Другий етап – налаштування місії: оператор обирає режим польоту: ручний або автономний. У ручному режимі оператор самостійно керує дроном, плануючи обліт візуально або за попередньо окресленими межами. У автономному режимі складається маршрут місії з вказаними точками обльоту, висотою польоту та швидкістю. Далі активується запис даних у системі Sniffer4D. Перед запуском обов'язково перевіряється, чи система збрала GPS-координати, чи ввімкнено запис на SD-карту або чи стабільно працює телеметричний канал (наприклад, 4G). Після підтвердження готовності запускається сам політ.

Третій етап – виконання польоту. Дрон виконує обліт визначеної зони або за маршрутом, або під керуванням оператора. У процесі польоту система Sniffer4D проводить вимірювання у реальному часі, передаючи інформацію на ноутбук або планшет. Концентрації газів, твердих частинок та інших параметрів відображаються на екрані у вигляді цифрових значень, графіків або мап. Якщо система фіксує перевищення концентрацій забруднюючих речовин, оператор може змінити маршрут, зупинити політ або здійснити детальніший обліт проблемної ділянки на малій висоті. У разі відсутності перевищень місія продовжується відповідно до первинного плану. При необхідності також проводиться вимірювання на різних висотах або за сітковим принципом, щоб сформувати тривимірну картину забруднення.

Четвертий етап починається після завершення збору даних, аерокopter повертається на точку зльоту вручну або автоматично. Після посадки відбувається вимкнення дрона та газоаналізатора, зупиняється передача даних, і зберігаються всі зібрані результати. Інформація експортується у форматах, що підтримуються програмним забезпеченням Sniffer4D Mapper – наприклад, у вигляді файлів CSV, PDF або картографічних форматів.

П'ятий етап – звітування та обслуговування. На цьому етапі оператор формує звіт за результатами місії, аналізує карти концентрацій забруднюючих

речовин у програмі Sniffer4D Mapper, передає інформацію відповідним екологічним або аварійним службам. Після цього прилад очищується у разі потрапляння в агресивне середовище, перевіряється стан фільтрів та сенсорів. Дрон і газоаналізатор заряджаються та готуються до наступного польоту. У разі потреби або після кількох місій також здійснюється періодичне калібрування сенсорів для забезпечення точності майбутніх вимірювань.

Запропонована схема охоплює повний цикл використання комплексу для мобільного моніторингу атмосферного повітря і може слугувати базовою методичною основою для навчання операторів, складання інструкцій або включення в нормативно-технічну документацію [148].

4.6. Моделювання процесів розсіювання забруднюючих речовин від організованих джерел для складання оптимального маршруту аерокоптеру

Для моделювання використовувалася програма Screen View (Lakes Environment), що реалізує методику «Screening Procedures for Estimating The Air Quality Impact of Stationary Sources» (EPA 1995d) і дозволяє визначати розподіл концентрацій речовин від стаціонарних джерел з урахуванням висоти та метеорологічних умов (рис. 4.26 – 4.28) [149].

Вхідні дані до моделювання:

- висота джерела: 10 м;
- діаметр гирла викиду: 1 м;
- швидкість виходу газоповітряної суміші: 1 м/с;
- швидкість вітру біля земної поверхні: 1 м/с;
- температура газоповітряної суміші: 100 С;
- температура довкілля: 20 С;
- інтенсивність викиду: 1 г/с.

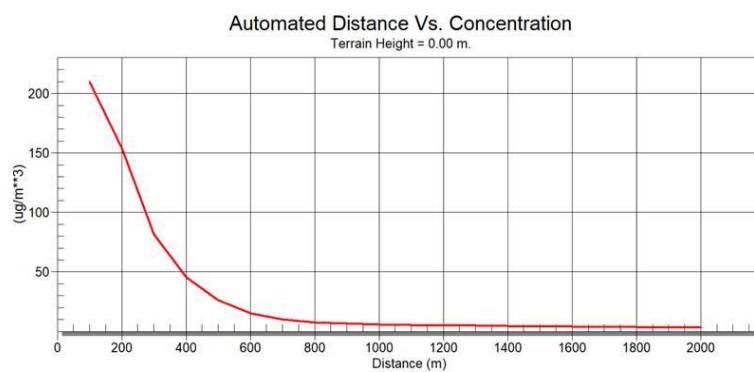


Рисунок 4.26 – Моделювання параметрів розсіювання забруднюючої речовини за умов сильної конверсії (дуже нестабільної стратифікації)

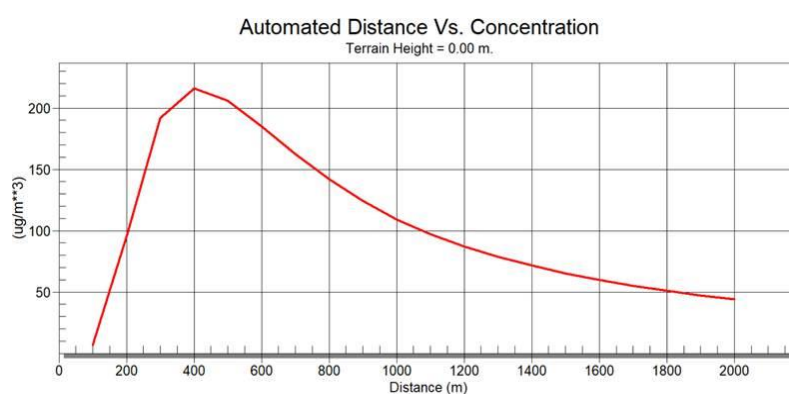


Рисунок 4.27 – Моделювання параметрів розсіювання забруднюючої речовини за умов нейтральної стратифікації атмосфери

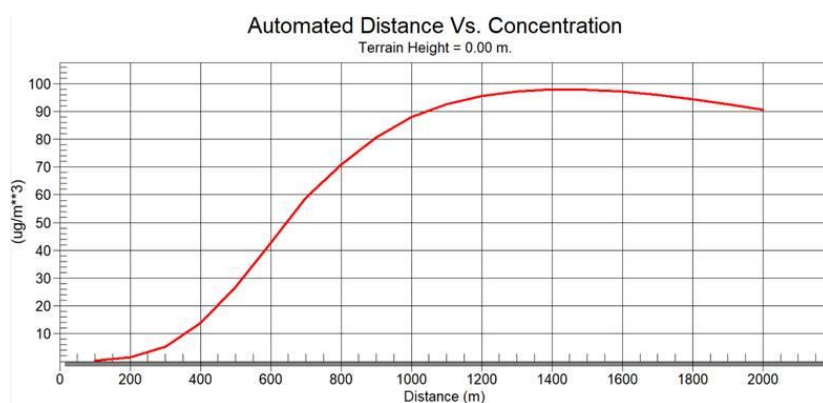


Рисунок 4.28 – Моделювання параметрів розсіювання забруднюючої речовини за інверсії конверсії (дуже стабільної стратифікації)

У рамках розробки високоточних мобільних платформ для моніторингу пропонується технічне рішення, що базується на використанні квадроаерокoptера з інтегрованою мультисенсорною системою аналізу атмосферного повітря, орієнтованою на оперативний контроль викидів під факельними установками та в зонах потенційного перевищення ГДК.

Конструктивно платформа реалізується на базі БПЛА типу мультиаерокoptер (мінімум 6-роторний з системою стабілізації IMU та автопілотом PX4), адаптованого до підвішування спеціалізованого блоку сенсорного модуля. Сенсорний модуль містить:

- газоаналізатори для визначення концентрацій CO_2 , NO_x , SO_2 , CH_4 , VOC з мінімальною чутливістю до 0,1 ppm;
- температурно-вологісний блок з високоточними сенсорами для корекції атмосферного стану при розрахунках розсіювання;
- оптичний аерозольний детектор для визначення масової концентрації твердих часток PM2.5/PM10;
- пробовідбірник із системою мікропомп для доставки повітря до міні-лабораторії або збереження зразків для подальшого лабораторного аналізу.

Управління здійснюється через наземну станцію, яка також виконує попередню обробку даних у режимі реального часу та формує карту концентрацій із прив'язкою до координат GPS/GLONASS. Інтерфейс БПЛА дозволяє задіяти алгоритм зондування по спіралі або векторному скануванню над об'єктами викидів, зокрема над факельними системами. Розрахунок фактичного об'єму викидів здійснюється на основі багатоточкової інтеграції по площі концентрацій з урахуванням швидкості вітру, визначеної за допомогою ультразвукового анемометра на борту.

Алгоритм аналізу просторово-часового розсіювання базується на вирішенні оберненої задачі розсіювання з використанням модифікованої моделі Гауса, адаптованої до умов турбулентності у нижньому шарі атмосфери, що враховує температуру, швидкість і напрямок вітру, а також топографічні особливості місцевості [150].

Розроблене технічне рішення дозволяє:

1. Виконувати зональний моніторинг у важкодоступних районах та на територіях, де відсутні стаціонарні пости контролю.
2. Миттєво виявляти перевищення концентрацій шкідливих речовин та локалізувати джерела викиду.
3. Формувати 3D-карти розсіювання з урахуванням реальних метеоумов.
4. Проводити довготривалі заміри з автономністю польоту до 40 хвилин та оперативною передачею даних на сервер для аналізу.

Обґрунтування та ефективність технічного рішення підтверджуються результатами впроваджених систем, аналогічних до DR1000 Flying Laboratory (Scentroid), дослідженнями ЕРА щодо тестування викидів, а також міжнародними практиками зондування атмосфери з дронів, описаними в роботах (АСР, 2024) [151].

Таким чином, варто враховувати, що загальна система моніторингу на урбанізованих територіях має складатися із всіх рівнів. З огляду на те, що завжди існують надзвичайні чинники виникнення нових джерел забруднення. Додаткові джерела забруднення виникають через надзвичайні ситуації, такі як військові дії, через що може виникати пожежі, вибухи. Для розуміння всіх відомих джерел забруднення, аналіз потрібен на всіх рівнях [152].

4.7 Реалізація технології інформування населення в системі моніторингу атмосферного повітря

Розгорнувши мережу з кількох постів спостереження, постає завдання інтеграції їх у єдину систему, аби дані з різних точок агломерації збиралися, оброблялися та аналізувалися централізовано. Сучасні технології інтернету речей (IoT) значно спрощують таку інтеграцію, пропонуючи інфраструктуру для з'єднання усіх датчиків воедино. Ключові аспекти інтеграції такі:

Єдина платформа збору даних. Кожен пост надсилає свої показники на сервер або хмарний сервіс у реальному часі. Можна використовувати як

власний міський сервер (на базі, наприклад, MQTT-брокера, реляційної БД чи Time Series), так і готові IoT-платформи (наприклад, ThingSpeak, AWS IoT, Google Cloud IoT тощо).

Важливо забезпечити уніфікований формат даних: показники різних забруднюючих речовин прив'язуються до часових міток і геолокації поста. Наприклад, повідомлення від поста може містити JSON: {"id": "DNipro_12", "time": "2025-03-18T12:00:00Z", "PM2_5": 35.2, "PM10": 50.1, "NO2": 24} тощо. Централізована база даних приймає ці повідомлення і зберігає для подальшого аналізу.

Комунікаційна мережа. В міських умовах доцільно побудувати мережу передачі даних, яка охопить усі пости (рис. 4.29).

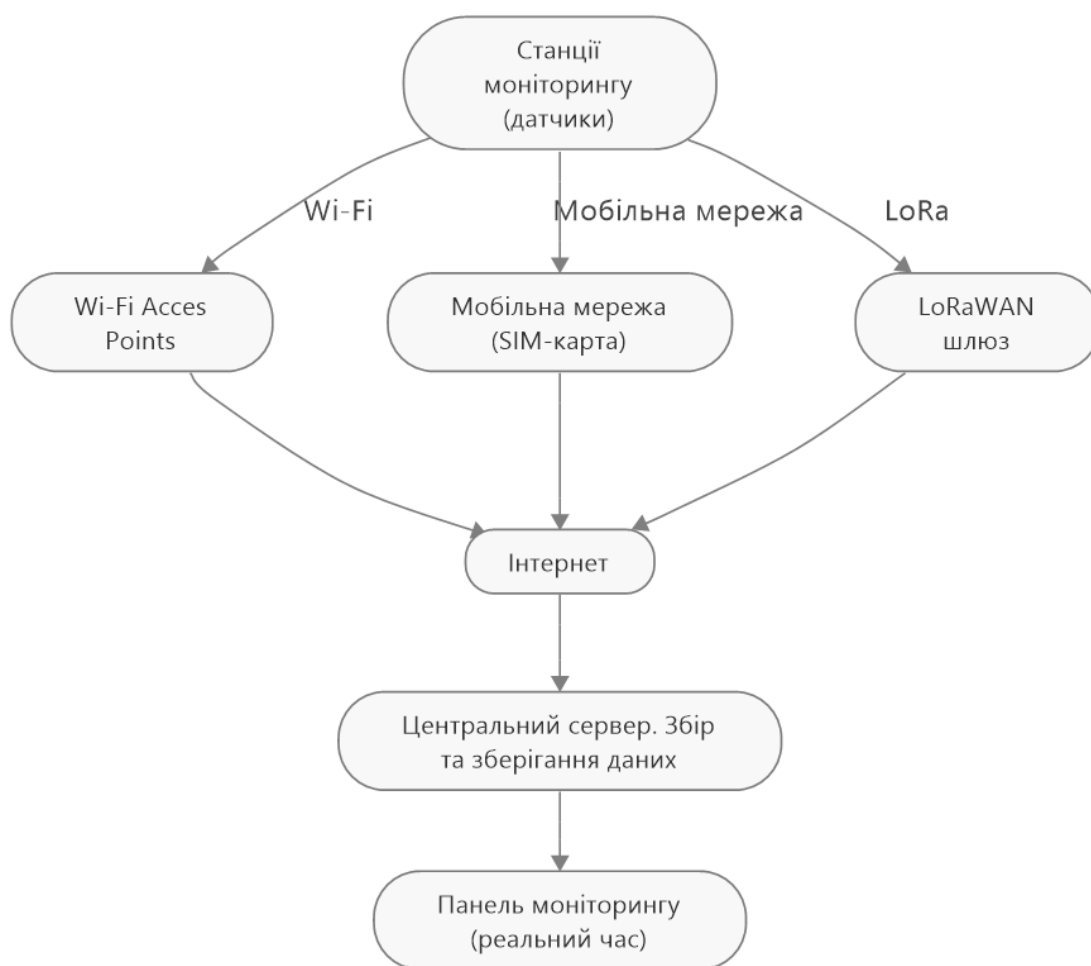


Рисунок 4.29 – Комунікаційна мережа

Якщо використовується Wi-Fi, потрібна наявність точок доступу або міської Wi-Fi мережі біля кожного поста. Більш гнучкий варіант – кожен пост має SIM-карту і використовує мобільний інтернет; тоді головне – забезпечити покриття оператором і бюджет на трафік (втім, телеметрія якості повітря – це малооб'ємні дані, навіть щохвилинна передача з десятків станцій становитиме кілька мегабайт на день). Використання LoRaWAN або інших LPWAN технологій дозволяє створити міську мережу з одним або кількома шлюзами, через які датчики будуть зв'язуватись з сервером. Така мережа працює на неліцензованих частотах (868 МГц в Європі), а один шлюз LoRa здатний обслуговувати сотні пристроїв в радіусі до 10 км в умовах урбанізованої території. Деякі населені пункти можуть розгорнути муніципальні IoT-мережі: наприклад, Лісабон обладнав мережу з 32 мультисенсорних модулів (на шум, повітря, клімат) з передачею даних на міську платформу в режимі реального часу.

Програмна інтеграція та інтерфейси. Всі пости мають працювати узгоджено, використовуючи однакові інтервали вимірювання та годинникову синхронізацію (варто на постах налаштовувати синхронізацію часу через NTP або GPS). Серверна сторона повинна підтримувати API для доступу до даних – як внутрішнього (для аналітичних модулів, що розраховують індекси якості повітря, роблять прогнози), так і зовнішнього (для надання інформації громадськості чи стороннім додаткам). Сучасні міські системи моніторингу часто включають відкриті інтерфейси, щоб будь-хто міг отримувати оновлені дані про стан повітря. Це сприяє прозорості та залученню громади. Наприклад, мережа PurpleAir надає відкритий API та онлайн-карти, де відображаються показники з тисяч датчиків по всьому світу. В контексті міста, дані зі всіх постів можуть агрегуватися на єдиному веб-порталі моніторингу (наприклад, ресурсу SaveEcoBot чи подібних), де у вигляді карти та графіків показано концентрації в різних районах (рис 4.30).

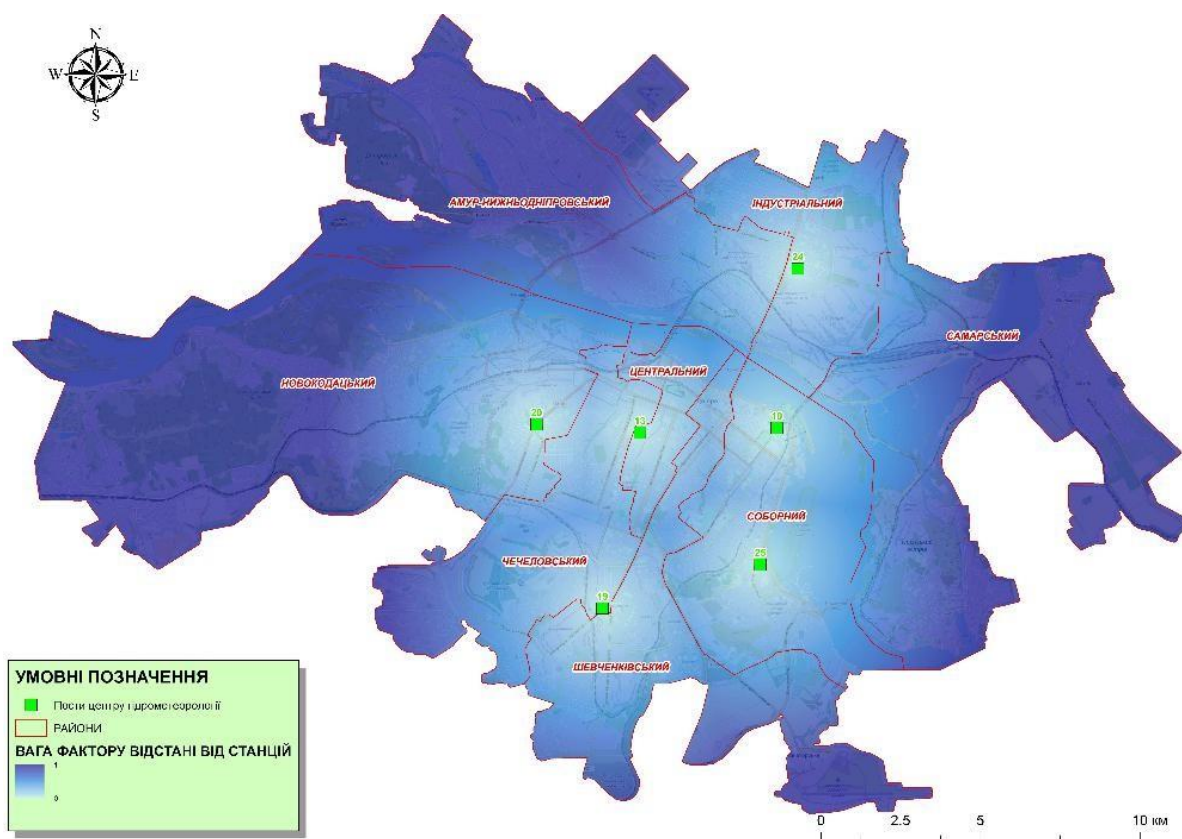


Рисунок 4.30 – Приклад інтерфейсу програми на карті агломерації Дніпро

Калібрування та валідація в мережі. Одне з важливих питань – як забезпечити довіру до показників великої кількості недорогих сенсорів. Для цього варто застосовувати методи перехресного калібрування: частину постів розміщувати поруч з офіційними стаціонарними постами, щоб отримати коефіцієнти корекції. Також можна робити періодичну ротацію: переносити окремі вузли для звірки один з одним. Існують алгоритми автоматичної калібровки мережі – наприклад, регресійні моделі чи нейромережі, що коригують дані з датчиків на основі показів референтних приладів і врахування факторів середовища. Всесвітня метеорологічна організація (WMO) рекомендує співрозміщувати (co-location) деякі LCS (low-cost sensors) з еталонними постами, щоб кількісно оцінити похибки і надалі поправляти дані всієї мережі.

Забезпечення якості даних і відмовостійкості. Єдина система має включати засоби виявлення збоїв: якщо якийсь пост перестав надсилати дані або показує аномально високі/низькі значення, система повинна сигналізувати

про це або системному адміністратору, в тому числі фахівцю, призначеному для спостереження та підтримки архітектури системи. Таким чином, на рисунку 4.31 показана схема забезпечення даних та відмовостійкості.

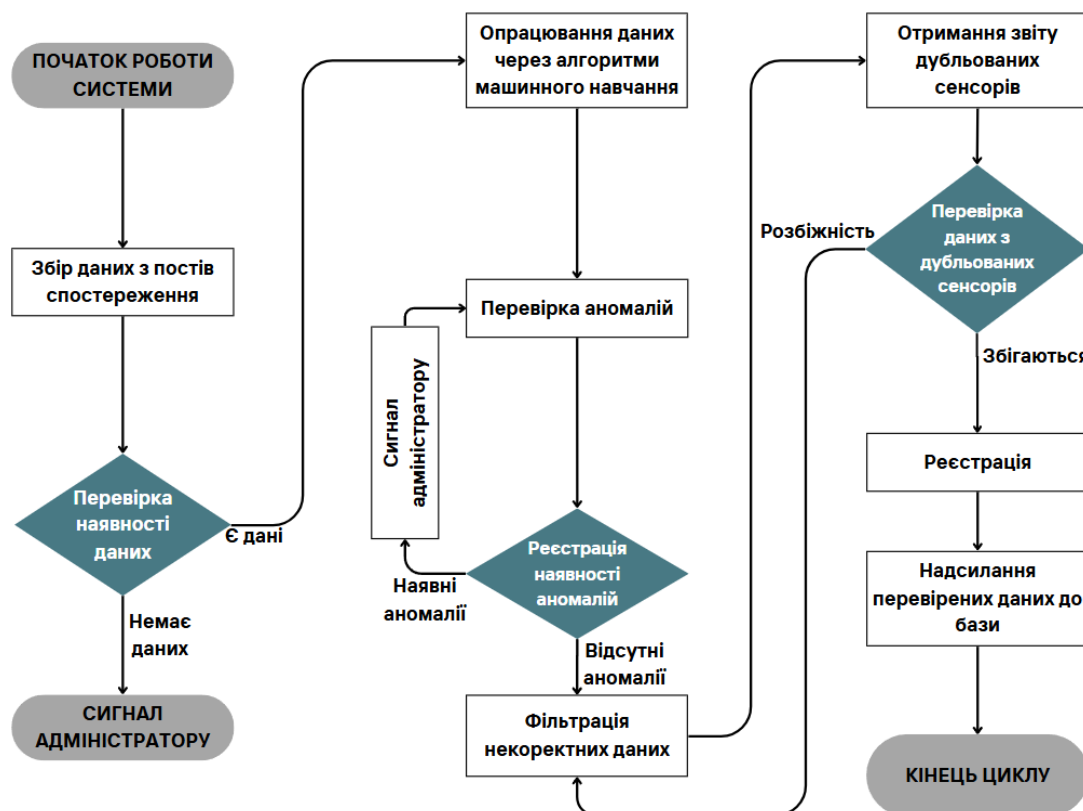


Рисунок 4.31 – Алгоритм забезпечення якості даних і відмовостійкості

Можуть впроваджуватись автоматичні фільтри: наприклад, відсів очевидно некоректних даних (на основі фізичних меж або порівняння з сусідніми постами). Для підвищення надійності даних інколи встановлюють дубльовані сенсори на одній пості. Таким чином, як раз, зроблено у пристроях «PurpleAir» – два однакових лазерних датчики пилу працюють паралельно, і система порівнює їх покази, щоб відстежити деградацію чи відхилення одного з них. У разі невідповідності, такий вузол може помітити проблему й видати попередження про потребу обслуговування (очищення або заміну датчика).

Інтеграція з іншими міськими, регіональними та всесвітніми даними. Дані про якість повітря обов’язково варто поєднувати з інформацією про погоду (температуру, вологість, вітер, в тому числі історичні та

прогнозовані показники), трафік та промислові викиди. Тому сучасні системи повинні мати інтерфейси для отримання даних з метеостанцій, GPS-трекерів громадського транспорту, даних про затори тощо. Наприклад, платформи типу smart city dashboard можуть відображати поруч з концентраціями забруднюючих речовин також температуру, швидкість вітру, що дозволяє краще інтерпретувати ситуацію (низький вітер і інверсія можуть сприяти накопиченню забруднень і пояснювати високі значення датчиків) [153].

Особливий сучасний тренд – забезпечення цілісності і достовірності даних при інтеграції. Оскільки дані можуть використовуватись для прийняття рішень, важливо захистити їх від втрат або фальсифікації. Для цього пропонуємо інноваційні підходи, такі як використання блокчейн-технології в мережах датчиків, що встановлені в даній технології на постах спостереження. Застосування блокчейну разом з IoT може забезпечити незмінність та прозорість екологічних даних: кожен вимір фіксується у спеціальному реєстрі, що унеможливорює непомітне редагування даних. Такі рішення наразі експериментальні, але вони демонструють прагнення міст до максимізації довіри до систем моніторингу. Ми пропонуємо архітектуру системи моніторингу атмосферного повітря, що гарантує їх достовірне збереження та доступність для всіх зацікавлених сторін.

Хоча впровадження таких технологій лише починається, вони демонструють інтеграцію постів моніторингу у справді єдину систему – як на рівні окремого міста, так і в масштабах усіх населених пунктів і промислових зон. Прикладом такої інтеграції є концепція «smart city»: пости встановлюються на інфраструктурних об'єктах (світлофорах, зупинках, дахах комунальних будівель) та підключаються до міської IoT-мережі.

Низька вартість сенсорів дозволяє розгорнути велику кількість постів, що забезпечує значно більш деталізовану й актуальну інформацію порівняно з поодинокими стаціонарними постами або разовими замірами, які нині є в агломерації Дніпро.

Технологія комплексної системи моніторингу повітря передбачає кілька важливих етапів: класифікацію джерел даних, використання ГІС–середовища, застосування алгоритмів машинного навчання для обробки інформації про нові джерела забруднення, врахування щільності населення за адміністративними районами, а також скарг громадян щодо якості повітря (рис. 4.32).

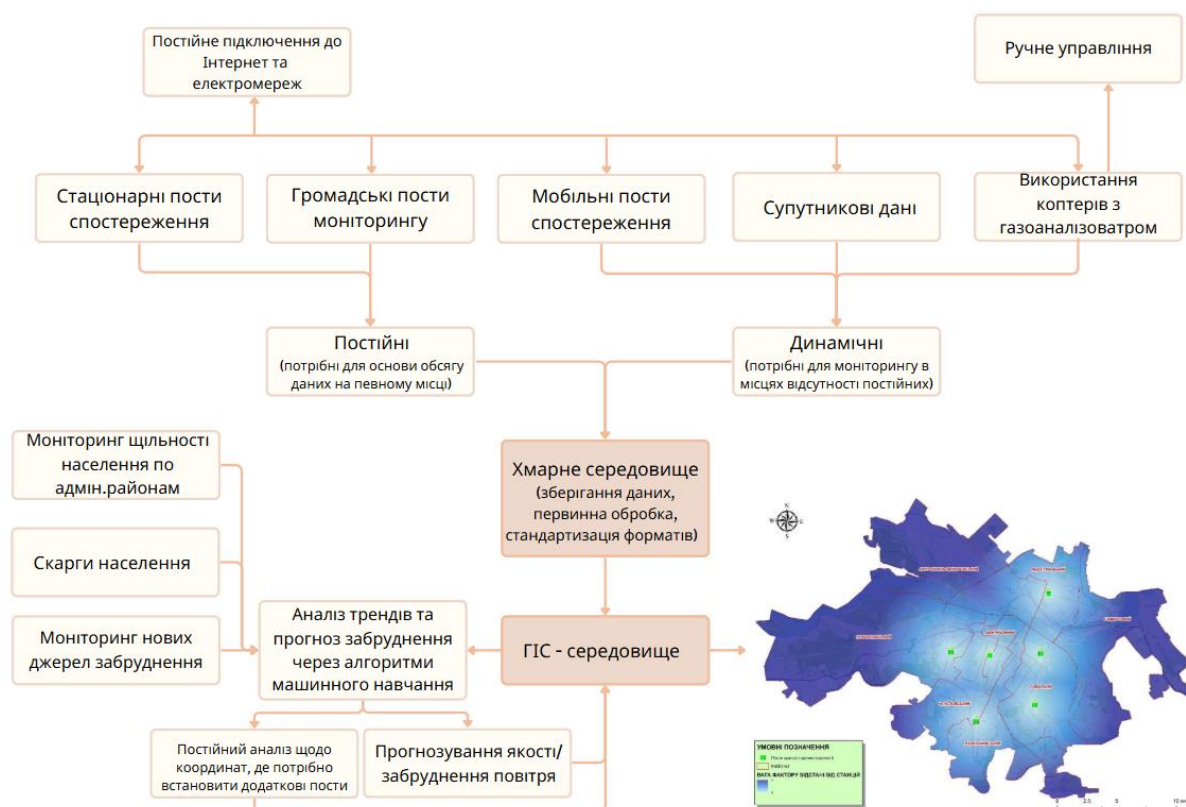


Рисунок 4.32 – Комплексна система моніторингу повітря

4.8. Реалізація інтелектуальної локальної багаторівневої системи моніторингу атмосферного повітря та оповіщення для промислових агломерацій в умовах кризових ситуацій

Технологія включає в себе всі описані в розділах компоненти моніторингу, такі як методологічна підтримка технології: методи та основи моніторингу повітря, законодавчі (Україною та ЄС) вимоги до розміщення та кількості постів спостережень, недоліки існуючої системи, обґрунтування

впливу воєнного стану на атмосферне повітря; обґрунтування вибору місць розташування постів спостережень, обґрунтування інтеграції в систему моніторингу як додаткового джерела негативного впливу – генератора, обґрунтування переліку устаткування для постів спостереження, основи моніторингу якості атмосферного повітря на основі використання аерокоптерів з додатковим обладнанням – газоаналізатором Sniffer4D та розрахунок розсіювання забруднюючих речовин з його допомогою, удосконалення технології інформування населення.

Будь-який моніторинг починається з технологічного оснащення посту спостереження датчиками аналізу якості повітря. Це включає в себе не тільки список сучасних датчиків, що є у вільному доступі у разі фінансування, але й алгоритм обґрунтування доцільності встановлення/придбання датчиків, які перевіряють наявність певної концентрації у повітрі тої чи іншої забруднюючої речовини. Наприклад, під час воєнного стану та ведення бойових дій доцільно встановлювати сучасний датчик виявлення концентрації толуолу, оскільки він виділяється при вибухах ракет, що описано в підрозділі 2.6., проте, при мирному часі його встановлення не є необхідним, оскільки регулярні вибухи ракет відбуваються виключно під час активних бойових дій. Окрема ситуація – організовані вибухи на кар'єрах, надзвичайних ситуаціях або будівельних вибухах. Для таких подій, під час мирного часу, доцільним є використання аерокоптеру з газоаналізатором, про що описано у підрозділі 4.3.

Сучасна система моніторингу повинна враховувати сучасні виклики, тому окрім вибухів ракет, доцільним є врахування робота генераторів та їхній вплив на атмосферне повітря у приземному шарі населених пунктів, про що описано у підрозділі 3.2.

Також, моніторинг повітря повинен включати технологію оперативного та своєчасного інформування населення щодо якості повітря, а також влади, яка в даному випадку описана в підрозділі 3.4., де передбачено інформування населення через вже встановленні департаментом транспорту табло

очікування міського транспорту на зупинках для інформування населення та розсилки інформації в міську/обласну владу через електронну пошту для прийняття управлінських рішень. Щодо інформування населення через табло – для більшості міст України, в тому числі Дніпра це є новою практичною цінністю, оскільки наразі цього немає. Дана система не виключає інтеграцію з ГІС-середовищами інших суб'єктів – міської/обласної влади або громадських систем і навіть рекомендується для інтеграції з ними через описані у розділах 3.3., 3.4 та 4.4 алгоритми дій та схеми комунікаційних мереж і підключення.

Інтегрована технологія моніторингу атмосферного повітря на основі інтелектуального модульного підходу. Технологія моніторингу, яку запропоновано в рамках цієї дисертації, є багаторівневою інформаційно-аналітичною системою, що базується на п'яти функціонально незалежних, але взаємопов'язаних модулях. Кожен модуль виконує окрему функцію в загальному технологічному циклі моніторингу, що охоплює як технічну інфраструктуру, так і інформаційно-аналітичну складову з елементами машинного навчання, систем розповсюдження інформації та кіберзахисту.

Модуль 1: Алгоритм оснащення посту моніторингу. Відповідає за інтелектуальну конфігурацію сенсорного обладнання у заданій локації. З урахуванням типів джерел забруднення (стаціонарні, рухомі), метеоумов (роза вітрів, інверсії), щільності населення, типу забудови та транспорту, формується запит на вибір сенсорного складу. Алгоритм включає базову експертну систему, що враховує потенційні забруднюючі речовини (CO, NO₂, PM2.5, VOC тощо); оцінює енергоспоживання й автономність, що важливо для точок на сонячних батареях у важкодоступних районах; верифікацію – або вручну, або через модель, натреновану на аналогічних сценаріях. Це дозволяє адаптувати систему до конкретних умов, оптимізуючи витрати і підвищуючи ефективність збору даних.

Модуль 2: Комунікаційна платформа та інтеграція. Забезпечує збір, передачу та інтеграцію даних. Він формує мобільну інфраструктуру з доступом у реальному часі та взаємодією з громадськістю. Основні елементи:

передача через NB-IoT, LoRa або Wi-Fi, залежно від розміщення й енергоспоживання; інтеграція з громадським інформуванням (табло на зупинках, вивід даних для мешканців); мобільний додаток зі сповіщеннями (SMS, email, пуш); API для міських служб, що дає змогу отримувати графіки, звіти чи активувати реагування на перевищення.

Модуль 3: Відмовостійкість та самодіагностика. Надійна система має включати самодіагностику, резервування та автономне реагування. Реалізовано декілька захисних механізмів: автоматичний моніторинг технічного стану (температура корпусу, живлення, відхилення у даних); локальне збереження даних при втраті зв'язку з сервером; виявлення несправностей, як-от зависання значень; система сповіщення для технічного персоналу. Це забезпечує стабільну роботу пристроїв у довготривалому режимі.

Модуль 4: AI-аналітика і прийняття рішень. Інтелектуальне ядро системи. Забезпечує аналіз даних, класифікацію ситуацій, прогнозування й формування рекомендацій. Функції: розпізнавання рівнів забруднення – від норми до надзвичайної ситуації; створення рекомендацій для різних аудиторій (громадяни, школи, лікарні, влада); навчання на історичних даних для підвищення точності; застосування ML-моделей, що враховують сезонність, метеоумови й людський фактор. Це дає змогу перейти до проактивної моделі реагування.

Модуль 5: Кібербезпека та захист даних. Захист системи є критичним у сучасних умовах. Реалізовані заходи: шифрування каналів (TLS/SSL, AES); авторизація пристроїв і користувачів, контроль доступу; захист від підміни або злому; логування всіх дій та спроб доступу в окремому журналі. Це забезпечує надійність системи в умовах зростаючих кіберзагроз (рис. 4.33).

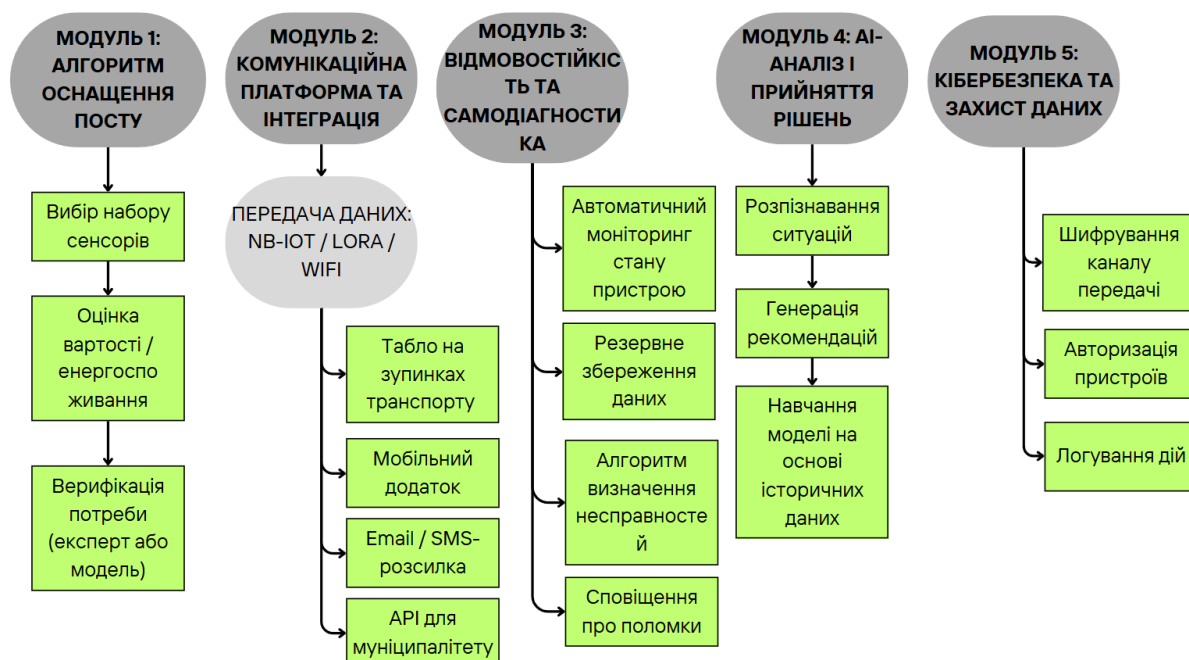


Рисунок 4.33 – Багатомодульна технологія моніторингу атмосферного повітря

При цьому, побудова технології повинна складатися не з модулів, які описані для деталізації, а з алгоритму рівнів з послідовними діями.

Рівень 1: Джерела даних (Data Input Layer). Перший рівень системи становить фундамент – це шар, де формується база для аналізу стану повітря. Тут інтегруються всі доступні джерела екологічної інформації, як традиційні (стаціонарні пости), так і інноваційні (дрони, генератори, краудсорсинг). Унікальною особливістю є використання безпілотників із системою Sniffer4D, які забезпечують тривимірну картографію забруднень і дають змогу аналізувати склад повітря у важкодоступних або небезпечних зонах (сміттєзвалища, зони пожеж чи воєнні події). Система також враховує показники неорганізованих джерел забруднення – наприклад, генератори, які стали актуальними в умовах війни. Іншим унікальним джерелом інформації є скарги мешканців, що надходять через Telegram-боти, гарячі лінії або міські додатки – ці звернення оцифровуються й стають вхідним сигналом для аналітики. Це дозволяє системі не лише вимірювати, а й «відчувати» екологічний стан через соціальну взаємодію.

Рівень 2: Передача та агрегація даних (IoT & Network Layer). Після збору дані передаються на сервер або хмарну платформу за допомогою різних каналів зв'язку: GSM/3G/4G, NB-IoT, LoRaWAN або Wi-Fi. Кожен пост автоматично підбирає найкращий канал, залежно від розташування. У разі втрати зв'язку система продовжує зберігати дані локально, а при відновленні – синхронізує їх із сервером. Це гарантує безперервність і повноту моніторингу. Завдяки цьому рівню забезпечується ефективна передача інформації для обробки, навіть в умовах аварій чи нестабільного зв'язку.

Рівень 3: Аналітика, ШІ та виявлення ризиків (AI & Data Processing Layer). На цьому рівні відбувається попередня обробка, усереднення, фільтрація даних, а також їхній аналіз із застосуванням алгоритмів машинного навчання. Система може виявляти перевищення ГДК, розпізнавати аномальні ситуації, здійснювати прогнозування рівнів забруднення на основі метеоумов та історичних даних. Інтегровано механізми прогнозування небезпечних подій (наприклад, смогу), а також сценаріїв реагування. Інтелектуальні моделі здатні самонавчатись, підвищуючи точність аналізу з часом. Цей рівень перетворює первинні дані на дієву інформацію [143].

Рівень 4: Інформування, інтеграція та візуалізація (Public Communication Layer). Рівень відповідає за донесення інформації до населення та органів влади. Інформація подається через електронні табло на зупинках, мобільні додатки, веб-сервіси, Telegram-боти, електронну пошту. У разі фіксації критичних рівнів забруднення активуються автоматичні повідомлення з рекомендаціями (обмежити перебування на вулиці, використовувати маски тощо). Для міських служб формуються аналітичні звіти з візуалізацією даних. Цей рівень забезпечує своєчасне прийняття управлінських рішень і підвищення екологічної обізнаності громадян.

Рівень 5: Кіберзахист і валідація даних (Security & Trust Layer). Завершальний рівень забезпечує достовірність та захищеність системи. Тут реалізовано протоколи шифрування, авторизацію пристроїв, резервне збереження даних, а також автоматичне виявлення технічних збоїв

(наприклад, збоїв у сенсорах). В окремих реалізаціях можливе застосування технології блокчейн для фіксації кожного запису, що гарантує незмінність даних. Передбачено механізми самодіагностики пристроїв, дублювання сенсорів і перехресну перевірку. Це забезпечує високу надійність навіть за умов технічних чи кіберзагроз.

Загалом, представлена технологія (рис. 4.34) є багаторівневою інтегрованою системою моніторингу, яка поєднує збір даних із різних джерел (сенсори, аерокoptери, мобільні маршрути), бездротову передачу (через IoT-технології), інтелектуальну обробку за допомогою ШІ, а також відкриту комунікацію з населенням і надійний кіберзахист. Такий підхід забезпечує не лише оперативність виявлення екологічних загроз, а й прозорість, точність і адаптивність системи до реальних умов. Впровадження цієї технології дозволяє муніципалітетам ефективно реагувати на зміни якості повітря, залучати громадськість до моніторингу та інтегруватися у міжнародні екологічні платформи. Це рішення має високу практичну цінність і готове до масштабування на рівні міста, області чи навіть країни.

Представлена локальна система пропонує комплексний підхід по декільком чинникам – це поєднання існуючих досліджень та нові компоненти системи, які покращують комплексний підхід. Нові компоненти – це:

- використання аерокoptерів (Рівень 1: Data Input Layer), детальна доцільність чого доведена у підрозділах 4.3. та 4.4;
- ШІ-аналіз та самодіагностика і автоматичне калібрування через алгоритми машинного навчання (Рівень 3: AI & Data Processing Layer), доцільність чого описана та доведена у підрозділах 1.3, 2.3, 4.2., 4.5. [153];
- виведення інформації про якість повітря на табло (Рівень 4: Public Communication Layer), що розташовані на зупинках громадського транспорту, на яких вказано час прибуття машини конкретного маршруту, доцільність чого описана та доведена у підрозділі 4.4.

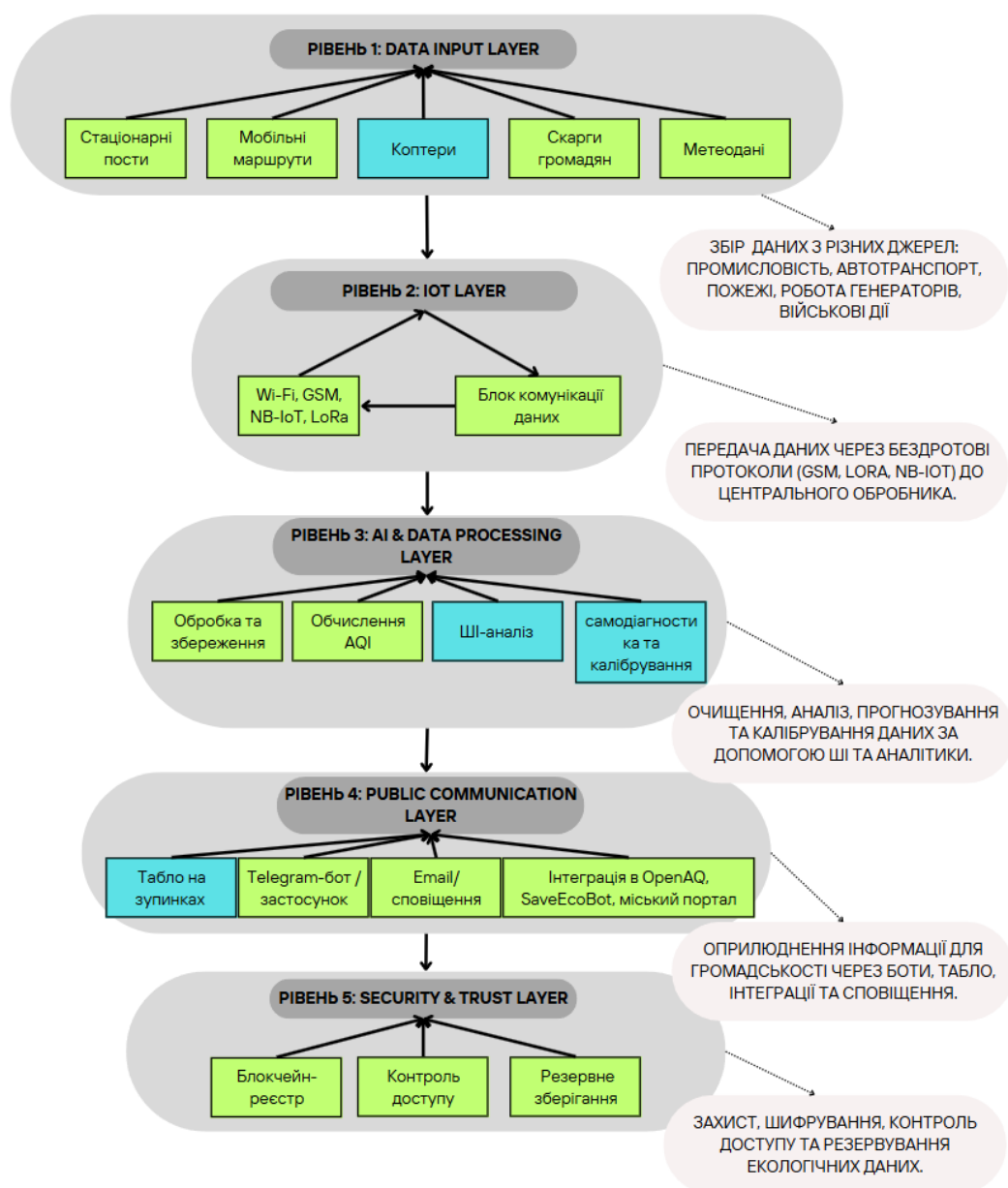


Рисунок 4.34 – Інтелектуальна локальна система моніторингу якості атмосферного повітря

4.9. Оцінка практичної цінності удосконаленої системи моніторингу атмосферного повітря

Впровадження мережі сучасних постів моніторингу здатне принести агломерації Дніпро значну практичну користь. Підвищення щільності вимірювань (багато точок контролю по різних районах) забезпечує детальне дослідження просторового розподілу забруднення. Замість поодиноких

стаціонарних станцій, що охоплюють великі зони лише усередненими показниками, мережа з десятків компактних датчиків дає гіперлокальні дані – тобто інформацію про якість повітря на рівні окремих вулиць, районів, поруч із джерелами викидів (табл 4.6).

Таблиця 4.6 – Практична цінність гіперлокального моніторингу якості повітря

Напрямок	Опис
Планування міської політики	Дані допомагають ухвалювати рішення щодо транспорту, озеленення, зонування та екологічного регулювання
Оперативне реагування	Можливість швидко реагувати на пікові рівні забруднення – наприклад, обмежити рух транспорту
Громадська обізнаність	Жителі можуть слідкувати за якістю повітря у своєму районі, що сприяє екологічній свідомості
Оцінка ефективності заходів	Вимірювання дозволяють перевірити, чи дають результати нові ініціативи або політики
Наукові дослідження та аналітика	Детальні дані корисні для вивчення впливу забруднення на здоров'я та довкілля

Це дозволяє виявити «гарячі точки» забруднення (наприклад, перевантажені перехрестя з високим рівнем NO₂ і CO чи промзони, де часто перевищується концентрація пилу) та відслідкувати динаміку змін (добові коливання, епізоди смогу, вплив погодних умов). Практична цінність такої детальної картини проявляється в декількох напрямках: планування міської політики, оперативне реагування, громадська обізнаність, оцінка ефективності заходів, наукові дослідження та аналітика – гіперлокальні дані корисні для екологів, урбаністів і медиків, які вивчають вплив забруднення на здоров'я та екосистеми.

Окрім цього, далі описані важливі напрями практичної цінності.

Більш ефективне управління якістю повітря. Влада міста отримує оперативні дані для прийняття рішень. Наприклад, знаючи про підвищення

PM2.5 в певному районі, можна вчасно поливати дороги або обмежувати рух транспорту. Якщо мережа показує збільшення концентрацій озону в сонячний день, можна завчасно попередити населення про небажаність тривалого перебування на відкритому повітрі. Вимірювання в реальному часі дозволяють переходити від реактивних заходів до проактивних. Девізом є: «неможливо управляти тим, що не вимірюєш». З доступом до якісних вимірів місто отримує інструмент для контролю екологічної ситуації, в тому числі за допомогою машинного навчання [154].

Відстеження відповідності нормативам і оцінка ефективності заходів. В Україні існують гранично допустимі концентрації основних забруднюючих речовин [165]. Покращена система моніторингу дозволяє більш точно визначити, де і коли перевищуються ці норми. Це дає можливість цілеспрямовано впроваджувати заходи (наприклад, оптимізувати транспортні потоки, модернізувати фільтри на підприємствах) і оцінювати їх результат за даними мережі. Якщо, приміром, введено нову схему руху або екологічну ініціативу (зниження швидкості руху, озеленення), датчики покажуть, чи знизилися концентрації порівняно з доопераційним періодом. Таким чином, політики боротьби із забрудненням отримують кількісну підтримку. За даними досліджень, міста, що впровадили щільні мережі сенсорів, змогли краще обґрунтувати екологічні цілі та відстежувати їх досягнення.

Підвищення поінформованості та залучення громади. Коли дані про якість повітря доступні населенню в зрозумілій формі (через веб-сайти, мобільні додатки, інформаційні табло), це стимулює громадян дбайливіше ставитись до довкілля і власного здоров'я. Люди можуть планувати свою активність: наприклад, уникати пробіжок уздовж жвавих магістралей у час пік, або провітрювати приміщення у години, коли датчики показують чистіше повітря. Прості індекси якості повітря (AQI), розраховані на основі сенсорних даних, і рекомендації (на кшталт «повітря зараз чисте – гуляйте спокійно» чи «якість повітря погана – обмежте перебування зовні») можуть транслюватися в режимі онлайн. У Лондоні пілотний проект Breathe London з мережею із ~100

низьковартісних датчиків публікував гіперлокальні дані на мапі, що підвищило обізнаність населення про проблему і дозволило жителям дізнаватися про стан повітря на своїй вулиці.

В Дніпрі аналогічна система могла б стати частиною міського порталу або додатку, показуючи, де сьогодні чисте повітря для відпочинку, а де – ні. Крім того, залучення громадськості може проявлятися через citizen science: недорогі датчики можна передавати школам, активістам, щоб вони встановлювали їх у себе та підключали до спільної мережі. Це підвищує довіру до даних і формує спільну відповідальність за екологію міста.

Додаткові знання для науки та медицини. Високороздільні (у просторі й часі) дані про забруднення повітря відкривають нові можливості для наукового аналізу. Епідеміологи можуть детальніше дослідити зв'язок між здоров'ям населення і рівнями впливу – аж до конкретних районів і коротких епізодів. Моделювання розповсюдження домішок по місту стає точнішим, бо є реальні дані для валідації моделей. Прогнозування якості повітря також виграє: на основі масиву сенсорних даних та метеоумов можна тренувати моделі (в тому числі з використанням ШІ) для прогнозу смогу за кілька годин/днів наперед. Це дає можливість завчасно попередити про очікуване погіршення повітря і вжити превентивні заходи. Практичний ефект – зменшення шкідливого впливу на людей, адже якщо відомо наперед про високий рівень забруднення, можна тимчасово посилити прибирання, перекрити рух, порадити людям носити маски тощо. Зрештою, поліпшення якості повітря прямо впливає на здоров'я населення: ВООЗ оцінює, що забруднене повітря призводить до близько 7 млн передчасних смертей у світі щороку [156]. Отже, інвестиції у моніторинг та заходи з очищення повітря мають і соціально-економічний вимір (зменшення витрат на лікування, підвищення продуктивності праці за рахунок кращого здоров'я громадян тощо) [131].

Низькі витрати на підтримку та масштабування. Низьковартісні мережеві датчики потребують мінімального обслуговування (переважно

періодична перевірка/калібрування та при необхідності – заміна дешевих модулів). Це вигідно відрізняє їх від старих стаціонарних постів, де калібрування дорогих газоаналізаторів і заміна фільтрів – трудомісткі і коштовні процеси. Досвід показує, що обслуговування розгалуженої мережі LCS цілком під силу місту навіть з обмеженим бюджетом, адже датчики мають низькі енергопотреби та автономність, їх легко замінити у разі виходу з ладу. До того ж, масштабування такої мережі (додавання нових постів) не потребує принципово нових рішень – достатньо додати ще кілька модулів у проблемних місцях. Це робить систему гнучкою: вона може розвиватися поступово, охоплюючи все більшу територію або додаючи нові параметри контролю (наприклад, шумове забруднення, радіаційний фон – існують відповідні сенсори, які можна інтегрувати аналогічно).

Таким чином, вдосконалена система моніторингу – це технологія. Її ефективність реалізується тоді, коли дані активно використовуються у міському управлінні та громадському житті. Успішним прикладом є міста, які на основі сенсорних мереж запровадили конкретні дії: Париж і Лондон адаптували транспортну політику в районах, де датчики виявили високі рівні забруднення; Лос-Анджелес інтегрував дані з сотень датчиків PurpleAir у свою систему реагування на лісові пожежі та смог (для випуску попереджень населенню). Тому практична цінність для Дніпра буде безперечною в даному дослідженні, якщо на основі отриманої інформації місто впроваджуватиме цільові екологічні заходи та інформуватиме мешканців. Вартість реалізації такої мережі відносно невелика, а потенційний виграш – чистіше повітря і здоровіші жителі – є стратегічно важливим.

Таким чином, важливо мати технічний алгоритм, за яким можна оцінити систему моніторингу атмосферного повітря. За цією технологією, можна оцінити як запропоновану систему, так і будь-яку іншу реалізовану. Це допоможе агломераціям та промисловим комплексам робити аргументований та об'єктивний вибір, яку саме систему моніторингу застосувати (рис. 4.35).



Рисунок 4.35 – Технічний алгоритм оцінки дієвості системи моніторингу

У сучасних підходах до моніторингу якості атмосферного повітря дедалі важливішу роль відіграють новітні технології, зокрема використання безпілотних літальних апаратів – дронів. Ці мобільні платформи значно розширюють можливості збору екологічної інформації, особливо в зонах, які важко або небезпечно досліджувати за допомогою традиційних стаціонарних методів. Алгоритм оцінки якості повітря, що інтегрує як дані з дронів, так і традиційні джерела інформації, побудований за принципами наукової обґрунтованості, точності та оперативності.

Процес розпочинається зі збору різноманітних типів даних. Сюди входять відомості з мережі стаціонарних постів моніторингу, дані з мобільних джерел – таких як дрони й пересувні лабораторії, а також архівна інформація та метеорологічні показники. Усі ці дані консолідуються, проходять процедуру перевірки на точність і узгодженість. Це важливий етап, адже саме якість вхідної інформації визначає достовірність усієї подальшої аналітики.

Після валідації дані піддаються аналітичній обробці. На цьому етапі проводиться зіставлення показників забруднення з ГДК, що дозволяє оцінити рівень небезпеки для здоров'я населення. Просторово-часовий аналіз допомагає виявити зони підвищеного ризику, тенденції змін концентрацій забруднюючих речовин у повітрі, а також локалізувати джерела забруднення, зокрема викиди з факельних установок.

Однією з ключових цілей такого моніторингу є оцінка ефективності вже впроваджених заходів зі зменшення забруднюючих викидів. Порівнюючи ситуацію до і після реалізації певних рішень, можна робити висновки про їхню результативність і доцільність масштабування.

Результати досліджень використовуються у кількох важливих напрямках. Вони слугують основою для підготовки офіційних звітів і прийняття рішень на рівні органів влади, інформують населення про екологічну ситуацію, формують базу для подальших наукових досліджень, а також дозволяють здійснювати соціально-економічну оцінку впливу забруднення повітря на стан здоров'я людей та інші суспільні показники.

Таким чином, інтеграція безпілотних технологій у систему моніторингу відкриває нові горизонти в управлінні довкіллям, підвищуючи точність, мобільність і ефективність контролю якості повітря.

Висновки до розділу 4

У розділі представлено комплексну технологію з удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря на прикладі агломерації Дніпро, що охоплює як стаціонарні, так і мобільні підходи до спостереження за якістю повітря.

Обґрунтовано алгоритм розміщення постів моніторингу з урахуванням рівнів забруднення, щільності населення та просторової віддаленості між постами. Запропоновано використання нормалізованих індексів забруднення та геоаналітичного аналізу, що дозволяє оптимізувати мережу спостережень у межах агломерації.

Сформовано критерії вибору обладнання для постів спостереження, де представлено переваги і недоліки різних типів сенсорів – як для твердих часток (PM2.5/PM10), так і газоподібних забруднюючих речовин (CO, NO₂, O₃, SO₂, VOC тощо). Описано технічну структуру поста моніторингу на базі доступних IoT-технологій, а також комунікаційні рішення (LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi тощо).

Показано ефективність використання дронів із мультисенсорними газоаналізаторами, зокрема DJI Matrice 300 зі Sniffer4D, для оперативного моніторингу у важкодоступних та небезпечних зонах, включаючи полігони відходів, місця техногенних аварій і шлейфи викидів. Такий мобільний підхід дозволяє отримувати тривимірну картину забруднення та підвищує швидкість реагування екологічних служб.

Здійснено моделювання процесів розсіювання забруднюючих речовин за допомогою програмного комплексу Screen View з урахуванням стратифікації атмосфери. Отримані результати дозволяють більш точно планувати маршрути дронів для збирання повітряних проб та аналізу вмісту забруднюючих речовин.

Розроблено архітектуру єдиної інформаційної платформи для збору, обробки та візуалізації даних у реальному часі. Вона інтегрує дані з постів моніторингу, дронів, метеостанцій та інших джерел, забезпечуючи прозорість, відкритість та надійність екологічної інформації. Передбачено алгоритми валідації, автоматичного аналізу та інформування населення.

Оцінено практичну цінність запропонованої системи: покращення міської політики управління станом повітря, зниження ризиків для здоров'я населення, підвищення екологічної свідомості громадськості, зручність у наукових дослідженнях та можливість масштабування з мінімальними витратами.

Запропоновано технічний алгоритм оцінки ефективності систем моніторингу, який може бути використаний для аналізу як створеної, так і

будь-якої іншої реалізованої мережі. Це створює передумови для впровадження адаптивного моніторингу в інших агломераціях України.

Таким чином, запропонована технологія створює надійну основу для переходу до інтегрованого, мобільного та масштабованого моніторингу, що відповідає сучасним викликам урбанізованого середовища і забезпечує ефективне управління якістю атмосферного повітря.

Результати досліджень відображені у публікаціях [131, 146, 148, 153, 154].

ЗАКЛЮЧНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря промислових комплексів та агломерацій, на основі удосконаленого методичного підходу отримання інформації про якість повітря; поєднання стаціонарних постів та мобільних засобів спостереження для отримання поточних даних та метеорологічних показників, в тому числі супутникових та за допомогою аероаерокоптерів з необхідними сенсорами; оцінювання і прогнозування концентрацій забруднюючих повітря речовин та їх розсіювання на територіях зазначених комплексів і агломерацій з використанням оперативно визначеного коефіцієнта турбулентної дифузії; застосування громадського моніторингу та оповіщення населення про екологічні небезпеки.

Отримано такі результати.

1. Здійснено комплексний аналіз міжнародних і національних систем моніторингу атмосферного повітря в агломераціях, включаючи сучасні та традиційні технології управління якістю повітря. Вивчено методологічні засади удосконалення таких систем, зокрема структуру, функціональні можливості, ступінь автоматизації та застосування інтелектуальних технологій. Окремо проаналізовано законодавчі вимоги України й ЄС щодо кількості та розміщення постів спостереження, що дозволило сформулювати власний підхід до оцінки ефективності систем моніторингу з урахуванням особливостей промислових агломерацій.

2. Проведено інвентаризацію існуючої мережі постів спостереження за якістю атмосферного повітря в агломерації Дніпро. Перевірено склад та оцінено рівень технічного забезпечення кожного поста: наявні типи сенсорів, діапазони вимірювання, частота передачі даних. Здійснено порівняльний аналіз рівня оснащення постів, відповідність сучасним вимогам точності вимірювань, ступеню автоматизації та мобільності систем моніторингу.

3. Розроблено та апробовано оригінальний метод та відповідну методику оцінювання екологічних наслідків воєнних дій (із застосування зброї масового ураження: снарядів, ракет, безпілотних літальних апаратів та ін.). Виявлено особливості впливу на атмосферне повітря та масштаби наслідків від вибухів, пожеж, горіння військової техніки, руйнування промислових об'єктів. Запропонована методика передбачає аналіз супутникових знімків досліджуваних агломерацій чи промислових комплексів та даних, побудову моделей розсіювання забруднюючих речовин на їх територіях з оцінкою довгострокових ризиків для довкілля та населення.

4. На основі виконаного геоінформаційного аналізу розсіювання та локалізації забруднення атмосфери на територіях агломерацій чи комплексів з використанням апріорних даних, обґрунтовано екологічно доцільні місця для розміщення та облаштування оновлених постів моніторингу. Розроблено рекомендації стосовно структури і складу їх технічного оснащення. Здійснено обґрунтований вибір сучасних мультисенсорних платформ, метеорологічних та телеметричних модулів. Запропонована структура забезпечує ефективне покриття моніторингових території з урахуванням рози вітрів і ландшафтних особливостей.

5. Проведено математичне моделювання процесів розсіювання забруднюючих речовин від організованих джерел (труб, вентиляцій тощо) з урахуванням метеоумов та уточнених коефіцієнтів турбулентної дифузії певних екологічно небезпечних домішок в приземній атмосфері. На основі отриманих результатів розроблено оптимальні маршрути аероаерокopterів із встановленими на них газоаналізаторами для оперативного виявлення зон підвищеного рівня забруднення. Маршрути враховують обхід наявних перешкод, зони турбулентності та мінімально необхідний час польоту.

6. Розроблено та реалізовано уніфіковану технологію розгортання системи моніторингу атмосферного повітря на локальному, регіональному та міжнародному рівнях, що відповідає національному законодавству, стандартам ЄС та принципам цифрового екологічного управління. Система

передбачає використання як стаціонарних, так і мобільних постів, а також аерокopterів із сенсорами. Забезпечено централізовану обробку й візуалізацію даних у середовищі ГІС, з інтеграцією супутникової інформації, функціями прогнозування, попередження та можливістю транскордонного моніторингу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці та обґрунтуванні технології розгортання системи моніторингу атмосферного повітря в агломераціях та промислових комплексах на різних рівнях, що забезпечує підвищення точності та оперативності контролю, дозволяє оперативно реагувати на екологічні загрози, інтегрувати розроблені моделі в системи міського управління, раннього попередження та мобільні платформи, враховує несприятливі метеоумови на період до 3–7 днів для прогнозування змін якості повітря, а також забезпечує усвідомлення та мінімізацію екологічних ризиків, пов'язаних із використанням боєприпасів, що сприяє вдосконаленню нормативних актів та підвищенню рівня екологічної безпеки в умовах воєнних дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 р. № 1264–ХІІ. Дата оновлення: 04.06.2017. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення: 07.06.2022)
2. Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля: постанова Каб. Міністрів України від 30.03.1998 р. № 391. Дата оновлення: 16.09.2015. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF> (дата звернення: 07.06.2022).
3. Про затвердження Порядку організації та проведення моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря: постанова Каб. Міністрів України від 09.03.1999 р. № 343. Дата оновлення: 30.10.2013. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/343-99-%D0%BF> (дата звернення: 20.05.2022).
4. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод: постанова Каб. Міністрів України від 20.07.1996 р. № 815. Дата оновлення: 30.10.2013. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/815-96-%D0%BF> (дата звернення: 21.05.2022).
5. Про затвердження Положення про моніторинг земель: постанова Каб. Міністрів України від 20.08.1993 р. №661. Дата оновлення: 25.04.2012. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/661-93-%D0%BF> (дата звернення: 16.06.2022).
6. Про затвердження Положення про моніторинг ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення: постанова Каб. Міністрів України від 26.02.2004 р. №51. Дата оновлення: 26.02.2004. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0383-04> (дата звернення: 30.05.2022).
7. Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. Екологічний моніторинг довкілля. Функціонування державної системи моніторингу довкілля. URL: <https://mepr.gov.ua/content/ekologichniy-monitoring-dovkillya.html> (дата звернення: 10.06.2022).

8. Про затвердження Змін до Порядку визначення величин фонових концентрацій забруднювальних речовин в атмосферному повітрі: наказ Мінприроди України від 30.07.2001 р. № 286. Дата оновлення: 20.01.2017. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0700-01> (дата звернення: 15.06.2022).

9. Федонюк М.А. До питання удосконалення системи державного екологічного моніторингу стану атмосферного повітря. Державне управління: удосконалення та розвиток. 2013. Вип. 2. URL: <http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=541> (дата звернення: 17.06.2022)

10. Бахарєв В. С. Недосконалість існуючої системи екологічного моніторингу атмосферного повітря на рівні урбосистеми: причини, наслідки, шляхи вдосконалення. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 5 (100). С. 76–81.

11. Про охорону атмосферного повітря: Закон України від 25.06.1991 р. № 1264–XII. Дата оновлення: 04.08.2016. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2707-12> (дата звернення: 10.05.2022).

12. Верховна Рада України. Законодавство України. Пункт 28,28 Постанови від 30 березня 1998 р. N 391 Київ «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text>.

13. Верховна Рада України. Законодавство України. Про затвердження Державної цільової екологічної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища. Постанова від 5 грудня 2007 р. N 1376, Київ, URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1376-2007-%D0%BF#Text>.

14. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Екологічний моніторинг довкілля. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. Про внесення змін до складу Міжвідомчої комісії з питань здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря URL: <https://mepr.gov.ua/documents/3741.html>.

15. Верховна Рада України. Законодавство України. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення 6.06.2022)

16. Центральна Геофізична Обсерваторія імені Бориса Срезневського. Спостереження за забрудненням атмосферного повітря в м.Києві. URL: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/index.php?fn=lsza&f=lsza> (дата звернення 12.06.2022).

17. SaveEcoBot – екологічний бот для моніторингу інформації про довкілля. URL: <https://www.saveecobot.com/static/about> (дата звернення 12.06.2022).

18. Радовенчик В. М.*, Іваненко О. І., Крисенко Т. В., Радовенчик Я. В. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» «Системи моніторингу якості повітря в м. Києві», 2022. URL <http://chemengine.kpi.ua/article/view/254161/251458>

19. Татарченко Г.О 2022 Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля «Теоретичні аспекти моделювання розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері» URL <http://mtp.knuba.edu.ua/article/view/256525/253584>

20. Шушпанов Д. Детермінанти здоров'я населення України: екологічний вимір. Регіональні аспекти розвитку продуктивних сил України, 2017. №22. С. 132–142. URL: doi:<https://doi.org/10.35774/rarrpsu2017.22.132>

21. Львів, Гринчишин Н.М Львівський державний університет безпеки життєдіяльності «РОЛЬ ЕКОЛОГІЧНОГО ФАКТОРА В ДЕПОПУЛЯЦІЇ НАСЕЛЕННЯ УКРАЇНИ», 2022 URL <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/9954/1/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%20%D0%9C%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BA%D0%BE.pdf>

22. Марікуца У., Березюк Б., Фармага І. Особливості побудови програмного забезпечення системи моніторингу навколишнього середовища. Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка": Комп'ютерні системи

проектування. Теорія і практика. Львів: НУ «ЛП», 2011. № 711. С. 31–32.

<https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jul/13600/6osoblivostipobudoviprogramnogozabezpechennya.pdf>

23. Лазаренко–Гевель Н. Перевірка структури мережі постів моніторингу атмосферного повітря засобами геоінформаційного аналізу. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Київ: КНУБА, 2013. №25. С. 104–105. <https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/18867/1/24-104-109.pdf>

24. Ловинська В. М., Ситник С. А., Голобородько К. К., Іванко І. А., Бучавий Ю. В., Алексєєва А. А. Study on accumulation of heavy metals by green plantations in the conditions of industrial cities. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2022. № 6. С. 117–122. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/117>.

25. Мокін В.Б., Дзюняк Д.Ю., Бондалєтов К.О., Олійник В.В. Метод і технологія моніторингу стану атмосферного повітря за допомогою універсальної інформаційно–вимірювальної системи з використанням мобільних пристроїв. Інформаційні технології та комп’ютерна техніка. Вінниця: Вінницький нац. техн. ун–тет, 2015. №4. С. 26–34.

26. Прищепов О.Ф., Алексєєва А.О. Організація системи моніторингу довкілля на регіональному рівні. Техногенна безпека. Миколаїв: Чорноморський держ. ун–тет ім. П.Могили, 2010. № 124 (Том 137). С.68–73

27. Бордюг Н. С. Освітньо–наукові та управлінські аспекти аналізу системи державного моніторингу довкілля. ScienceRise. Харків, 2016. №5(18). С.4–8.

28. Яковишина Т. Ф. Specificities of considering migration capability of heavy metals in assessing ecological hazard of polluting soils of urban ecosystems // Journal of Ecological Engineering. – 2025. – Т. 26, № 4. – С. 37–44. – Polish Society of Ecological Engineering (PTIE). <https://doi.org/10.12911/22998993/199525>

29. P. L. Meyer, M. W. Sigrist. Atmospheric pollution monitoring using CO₂-laser photoacoustic spectroscopy and other techniques. URL <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1141097>
30. W. Stumm, Globale Chemische Kreisläufe und ihre Beeinflussung Durch die Zivilisation (Hans-Erni-Stiftung, Luzern, 1985).
31. BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Ed., Ozon in der Schweiz (Schriftenreihe Umweltschutz, No. 101, Bern, Switzerland, 1989)
32. Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, Ed., Waldschäden und Luftverunreinigungen (Sondergutachten, Kohlhammer, Stuttgart, 1983).
33. A. Wellburn, Air Pollution and Acid Rain (Longman Scientific and Technical, Harlow, 1988).
34. P. Fabian, Atmosphäre und Umwelt (Springer, Berlin, 1984)
35. Photochemical Smog, OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development, Paris, 1982).
36. R. M. Harrison and R. Perry, Eds., Handbook of Air Pollution Analysis, 2nd ed. (Chapman and Hall, London, 1986).
37. R. W. Frei and J. Albaiges, Eds., "Air and Water Analysis," Current Topics in Environmental and Toxicological Chemistry (Gordon and Breach Science, New York, 1986), Vol. 9
38. L. H. Keith, Ed., Identification and Analysis of Organic Pollutants in Air (Butterworth, Boston, 1984).
39. W. Thain, Monitoring Toxic Gases in the Atmosphere for Hygiene and Pollution Control (Pergamon, Oxford, 1980).
40. G. M. Message, Practical Aspects of Gas Chromatography/Mass Spectrometry (Wiley, New York, 1984).
41. Dana Procházková. Theoretical background of environmental monitoring and its conception in the Czech Republic. Environmental Monitoring and Assessment. 1995. Vol 34, Issue 2, P. 105–113

42. Сухінін. Д.Є. Досвід Канади в організації та проведенні муніципального моніторингу. Публічне управління: теорія та практика. 2013. Вип. 1. С. 177–183.

43. A working definition of e-government, The Future of E-Government. 353 New York, Center for Technology in Government. 2003. URL: https://www.ctg.albany.edu/publications/reports/future_of_egov?chapter=2.

44. Eric Biber. The Problem of Environmental Monitoring. USA; Colorado: University Of Colorado Law Review. 2011. Vol. 83, Issue 1. 83 p.

45. Бахарєв В.С. Комплексна система екологічного моніторингу атмосферного повітря урбосистем дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук: 2018 Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського 105 с.

46. В.С. Бахарєв Матеріали міжнародної науково–практичної конференції «Ідеї академіка В. І. Вернадського та проблеми сталого розвитку освіти і науки» Кременчуцького національний університет імені Михайла Остроградського О.Л. Корцова Науково–технічний центр «Промекологія». Кременчук. Деякі аспекти аналізу звернень громадян з питань різкого погіршення якості атмосферного повітря ст. 91 2017 р.

47. Маренич А.В. Матеріали міжнародної науково–практичної конференції «Ідеї академіка В. І. Вернадського та проблеми сталого розвитку освіти і науки» Кременчуцького національний університет імені Михайла Остроградського О.Л. Корцова Науково–технічний центр «Промекологія». Кременчук. Виконання комплексу завдань моніторингу атмосферного повітря за допомогою пересувної муніципальної екологічної лабораторії в м. Кременчук ст. 92 2017 р.

48. О. Л. Корцова, І. О. Солошич, В. С. Бахарєв Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. До питання практичної реалізації вимог до визначення місць розташування автоматизованих постів в системі моніторингу атмосферного повітря техногенно навантажених урбосистем 2021. URL

[https://web.archive.org/web/20220120033301id_/http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/stat](https://web.archive.org/web/20220120033301id_/http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/stat/i/2021_3_2021-3-36-44.pdf)
[i/2021_3_2021-3-36-44.pdf](https://web.archive.org/web/20220120033301id_/http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/stat/i/2021_3_2021-3-36-44.pdf)

49. Bhargava, R. (1998), “Atmospheric air pollution monitoring”, Indian Journal of Engineering and Material Sciences, vol. 5, pp. 249–254.

50. Namieśnik, J., Wardencki W. (2002), “Monitoring and Analytics of Atmospheric Air Pollution”, Polish Journal of Environmental Studies, vol. 11, no. 3, pp. 211–218.

51. Thunis1, P., Degraeuwe1, B., Pisoni, E., Meleux, F., Clappier, A. (2017), “Analyzing the efficiency of short-term air quality plans in European cities, using the CHIMERE air quality model”, Air Qual Atmos Health, vol. 10, pp. 235–248

52. Sylwia Krol, Bozena Zabiegala, Jacek Namiesnik (2010), TrAC Trends in Analytical Chemistry «Monitoring VOCs in atmospheric air I. On-line gas analyzers» Pages 1092–1100.

53. Seung Ho Kim; Jong Mun Jeong; Min Tae Hwang; Chang Soon Kang. Development of an IoT-based atmospheric environment monitoring system 2017. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8190799>

54. An official website of the United States government. National Ambient air quality Monitoring Information System (NAMIS).

55. V. I. Besspalov, O. S. Gurova, N. S. Samarskaya. Main Principles of the Atmospheric Air Ecological Monitoring Organization for Urban Environment Mobile Pollution Sources 2016, Pages 2019–2024 URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816316058>

56. J. Namieśnik, W. Wardencki Monitoring and Analytics of Atmospheric Air Pollution (2002) URL <http://www.pjoes.com/pdf-87444-21303?filename=Monitoring%20and%20Analytics.pdf>

57. Jane Vignau–Laulhere, Hervé Plaisance, Pierre Mocho, Katarzyna Raulin, Yves Bigay, Valérie Desauziers. Performance of the Radiello® diffusive sampler for formaldehyde measurement: the influence of exposure conditions and ozone interference (2015) URL <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/ay/c5ay00996k/unauth>

58. W. Swaans, E. Goelen, R. De Fré, E. Damen, P. Van Avermaet, E. Roekens and V. Keppens. Laboratory and field validation of a combined NO₂–SO₂ Radiello passive sampler (2007) URL <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2007/em/b708925b/unauth>
59. Tran Thi Ngoc Lan, Nguyen Thi Thanh Binh Science of The Total Environment. Daily roadside BTEX concentrations in East Asia measured by the Lanwatsu, Radiello and Ultra I SKS passive samplers (2012) Pages 248–257 URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969712011801>
60. E. Gallegoa, F. J. Roca, J. F. Perales, X. Guardino Comparative study of the adsorption performance of an active multi-sorbent bed tube (Carbotrap, Carbopack X, Carboxen 569) and a Radiello® diffusive sampler for the analysis of VOCs (2011) Pages 662–672 URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0039914011003572>
61. Anne Pennequin–Cardinal, Hervé Plaisance, Nadine Locoge, Olivier Ramalhob, Séverine Kirchner, Jean–Claude Galloo Atmospheric Environment. Performances of the Radiello® diffusive sampler for BTEX measurements: Influence of environmental conditions and determination of modelled sampling rates (2005) Pages 2535–2544 URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231005000427>
62. Bozena Zabiegała, Magdalena Urbanowicz, Krystyna Szymanska, Jacek Namiesnik Application of Passive Sampling Technique for Monitoring of BTEX Concentration in Urban Air: Field Comparison of Different Types of Passive Samplers (2010), Pages 167–175, URL <https://academic.oup.com/chromsci/article/48/3/167/325398?login=false>
63. E. Gallego, F. J. Roca, J. F. Perales, X. Guardinob. Evaluation of the effect of different sampling time periods and ambient air pollutant concentrations on the performance of the Radiello® diffusive sampler for the analysis of VOCs by TD–GC/MS (2011) URL <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/em/c1em10075k/unauth>

64. Mariusz Marć, Bożena Zabiegała Application of passive sampling technique in monitoring research on quality of atmospheric air in the area of Tczew, Poland (2013) URL

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03067319.2013.791979>

65. T. Lauvaux, N. L. Miles, S. J. Richardson, A. Deng, D. R. Stauffer, K. J. Davis, G. Jacobson, C. Rella, G.P. Calonder, P. L. DeCola. Urban Emissions of CO₂ from Davos, Switzerland: The First Real-Time Monitoring System Using an Atmospheric Inversion Technique 2013 URL

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/52/12/jamc-d-13-038.1.xml>

66. Яцишин А.В., Попов О.О., Артемчук В. О. Використання інформаційних технологій в задачах управління екологічною безпекою. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса: ОНПУ, 2013. Вип. 2, № 41. С. 289–294.

67. Про Концепцію сталого розвитку України (Проект): Закон України [Електронний ресурс] / МНС України. – <http://www.mns.gov.ua> – 21.12.2011

68. Кисіль, Н.М. Теоретичні засади організації екологічного моніторингу в Україні за умов сталого розвитку / Н.М. Кисіль // Наук. вісн. НЛТУ України. – 2005. – Вип. 15.4. – С. 208 – 212.

69. Каменева, І.П. Комплексний аналіз екологічної безпеки міста на основі сучасних ГІС-технологій / І.П. Каменева, А.В. Яцишин, Д.О. Полішко, О.О. Попов // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – К. – 2008. – Вип. 5. – С. 41 – 46.

70. Артемчук В.А., Грибан О.А. Інформаційні системи та програмні засоби в галузі екологічної безпеки атмосферного повітря. *Моделювання та інформаційні технології*. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2010. Т. 1, спец. вип. С. 120–128

71. Koryagin M., Marinova O., Izhmulkina E. Information–analytical system of environmental monitoring technologically disturbed landscapes. 3rd Conference with International Participation Conference VIVUS. (14th and 15th November). 2014, Slovenia. P. 460–468

72. Ломазов П. К., Павличенко А. В. Система екологічного моніторингу на гірничих підприємствах. *Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*

«МОЛОДЬ: НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ», 22–24 листопада 2023 р.

<http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/166860>

73. Курочкін В. М. Система «ELFINTEST» обробки даних моніторингу довкілля на основі кластеризації. Наукоємні технології. Київ: НАУ, 2015. Вип. 2, № 26. С. 127–132.

74. Yacyshyn A.V. Ecologichna bezpeka technogenno–navantaghenych regioniv: aspekty upravlinnia. NTU «KhPI» Bulletin: New solutions in moderntechnologies. Kharkiv: NTU «KhPI». 2011. Vol. 24. P. 72–76.

75. Bartosz Balis, Tomasz Bartynski, Marian Bubak, Daniel Harezlak, Marek Kasztelnik, Maciej Malawski, Piotr Nowakowski, Maciej Pawlik, and Kasztelnik, Maciej Malawski, Piotr Nowakowski, Maciej Pawlik, and Bartosz Wilk. Smart levee monitoring and flood decision support system: reference architecture and urgent computing management. *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 108. P. 2220–2229.

76. Ferreira L., Putnik G., Lopes N., Lopes A., Cruz–Cunha M. A cloud and ubiquitous architecture for effective environmental sensing and monitoring. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 64. P. 1256–1262.

77. Rob Lokers, Rob Knapen, Sander Janssen, Yke van Randen, Jacques Jansen. Analysis of Big Data technologies for use in agro–environmental science. *Environmental Modelling & Software*. 2016. Vol. 84. P. 494–504.

78. Korobko A.V., Penkova T.G. On–line analytical processing based on formal concept analysis. *Procedia Computer Science*. 2010. Vol. 1. P. 2311–2317

79. С.А. Плахотній, М.В. Кротінова. Алгоритми інформаційно–аналітичного забезпечення системи моніторингу об’єктів навколишнього природного середовища у вугільній галузі: атмосферне повітря. «*Стратегія сталого розвитку у контексті екологічної безпеки*» ст. 152–155.

80. Bartosz Balis, Marian Bubak, Daniel Harezlak, Piotr Nowakowski, Maciej Pawlik, and Bartosz Wilk. Towards an operational database for real-time environmental monitoring and early warning systems. *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 108. P. 2250–2259.

81. Хазан, П.В., & Ангурець, О.В. (2017). Впровадження принципів «зеленої економіки» в Дніпропетровській області. Сучасний стан та проблеми розвитку статистики, обліку та аудиту в умовах глобалізації та енергозбереження: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. Дніпро, ПП «Акцент», 2, 203–205.

82. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області за 2017 рік (2018). Департ. екології та природних ресурсів Дніпропетровської облдержадміністрації.

83. Про затвердження Порядку розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях: Наказ Міністерства Внутрішніх Справ від №300, від 21.04.2021: веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0635-21#Text> (дата звернення: 08.05.2023).

84. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України №2697–VIII, від 28.02.2019 р.: веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Tex> (дата звернення: 10.05.2023).

85. World Health Organization. Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. (2006) Retrieved from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf

86. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря: методичні рекомендації. (2007). Затв. наказом МОЗ України від 13.04.2007 р. №184. 28.

87. Екологічний паспорт м. Дніпро за 2016 рік. (2017). Департ. транспорту та охорони навколишнього середовища Дніпропетровської міської ради.

88. Horova, A.I., Buchavyu, Y.V., & Kolesnyk, V.Y. (2016). Удосконалення системи інформування про ризики для здоров'я населення через забруднення атмосферного повітря. *Medical Informatics and Engineering*, (2). Ecological Safety and Labour Protection 190 doi:10.11603/mie.1996–1960.2016.2.6478

89. Рішення Дніпропетровської обласної ради № 680–34/VI від 21.10.2015 р. «Про Дніпропетровську обласну комплексну програму (стратегію) екологічної безпеки та запобігання змінам клімату на 2016–2025 роки». (2015) Retrieved from <http://www.oblrada.dp.ua/officialrecords/decisions/50/1316>

90. Хазан, П.В., & Ангурець, О.В. (2018). Побудова автоматизованої системи екологічного моніторингу в контексті сталого розвитку. Проблеми впровадження інформаційних технологій в економіці: матеріали ІХ Міжнародної науково–практичної інтернет–конференції. Ірпінь: Університет державної фіскальної служби України, 289–291.

91. Визначення ризиків здоров'я населення Дніпропетровська від забруднення атмосферного повітря промисловими підприємствами А.І. Горова, ЮВ Бучавий Гігієна населених місць, 74–80 2015

92. Методичні рекомендації з підготовки регіональних та загальнодержавної програм моніторингу довкілля [Електронний ресурс] // МІНІСТЕРСТВО ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0487556–01#Text>.

93. Договір про заснування Європейської Спільноти [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_017#Text.

94. Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text.

95. Бахарєв В.С. Функціональні особливості створення муніципальних систем моніторингу атмосферного повітря в Україні. *Екологія* – 2017: 358

збірник наукових праць VI Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю. (Вінниця, 20–22 вересня 2017 р.). Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 87.

96. Воронін, А. В. Стан відновлювальної енергетики України та перспективні напрями розвитку [Електронний ресурс] / Воронін, А. В., Панасюк, П. І. // Університет митної справи та фінансів. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <http://212.1.86.13/jspui/handle/123456789/4735>.

97. Бахарєв В. С. Комплексна система екологічного моніторингу атмосферного повітря урбосистем: дисертація... д-ра техн. наук, спец. Кременчук: Кременчуцький нац. ун-т ім. М. Остроградського, 2018. 402 с.

98. Bakharev V., Marenych A., Sankov P., Hilov V. The key aspects of atmospheric air ecological monitoring concept formation at the urban systems level. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2016. Vol. 4, Issue 7. P. 133–139. URL: http://ijiset.com/vol4/v4s7/IJISSET_V4_I07_18.pdf (Last accessed: 15.07.2017).

99. Ломазов П. К., Бучавий Ю. В. Удосконалення методики прогнозування несприятливих метеорологічних умов для розсіювання забруднювальних речовин в атмосферному повітрі. Збірник наукових праць НГУ. – 2025 №80, 301-314. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.301>

100. Ломазов П. К., Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Теоретичні основи побудови інформаційно-аналітичних систем в екологічному моніторингу атмосферного повітря. *Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «МОЛОДЬ: НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ», 22–24 листопада 2023 р.* <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/165755>

101. Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля (Орхуська конвенція). Конвенцію ратифіковано Законом № 832–XIV (832–14) від 06.07.99. URL: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/994_015.

102. Маренич А.В., Бахарєв В.С. Теоретичний базис розробки систем моніторингу якості атмосферного повітря урбосистем з використанням

пересувних лабораторних комплексів. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук: КрНУ, 2016. №. 5. Ч.2 (100). С. 77–82.

103. Ломазов П. К., Павличенко А. В. Впровадження міжнародного досвіду в системи екологічного моніторингу атмосферного повітря в Україні. *Матеріали XIII Міжнародної науково–технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2023.*

104. Нагієва А. І. Екологічні інновації: підтримка сталого розвитку процесів, продуктів та послуг [Електронний ресурс] / А. І. Нагієва, З. Михайло // Національний авіаційний університет. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <http://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2054>.

105. Buchavyi Yu. Development of the environmental monitoring system as a basis for ensuring sustainable development of local communities / Yurii Buchavyi, Pavlo Lomazov // *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities: collection of scientific articles.* – Dresden, 2024. – Pp. 84–86. https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/167801/0%20%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BA%D0%B0%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B9-%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%BB._fin-84-86.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

106. Ломазов П. К. Взаємозв'язок системи екологічного моніторингу атмосферного повітря та сталого розвитку місцевих громад. *Тези Всеукраїнської науково–практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 2022.* <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/32.pdf>

107. Ломазов П.К, Павличенко А.В. “Комплексна оцінка екологічного стану навколишнього середовища в гірничопромислових регіонах” // *Матеріали XV Міжнародної науково–технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», секція № 24 «Перспективи освоєння критичної мінеральної сировини в Україні та Європейському Союзі», м. Дніпро, 26–28 березня 2025 р. – Дніпро: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2025.*

108. Huanqin W. Review on recent progress in on–line monitoring technology for atmospheric pollution source emissions in China [Електронний ресурс] / Wang Huanqin // Journal of Environmental Sciences. – 2023. – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074222003515>.

109. Лізунков, О. В. Організація контролю викидів шкідливих речовин цементного заводу / О. В. Лізунков // Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – Вип. 5 (36). – Ч. 1. – С. 183–188. Режим доступу до ресурсу:

<http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/12517>

110. A new methodology to derive settleable particulate matter guidelines to assist policy–makers on reducing public nuisance: веб–сайт. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/> (дата звернення: 07.05.2023).

111. Yong–Lai Feng. Intermediate volatile organic compounds in Canadian residential air in winter: Implication to indoor air quality [Електронний ресурс] / Yong–Lai Feng, Chun Yang, Xu–Liang Cao // Chemosphere. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138567>.

112. Román Pérez Velasco. Update of the WHO global air quality guidelines: Systematic reviews – An introduction [Електронний ресурс] / Román Pérez Velasco, Dorota Jarosińska // Environment International. – 2022. – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412022004834>.

113. Green intellectual capital and environmental management accounting: Natural resource orchestration in favor of environmental performance [Електронний ресурс] / Kaveh Asiaei, Nick Bontis, Raziye Alizadeh, Mehdi Yaghoubi // Wiley Online Library. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bse.2875>.

114. Jl. Veteran. Mediation role of environmental management accounting on the effect of green competitive advantage on sustainable performance [Електронний ресурс] / Jl. Veteran, East Java // Journal of Sustainability Science

and Management. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://jssm.umt.edu.my/wp-content/uploads/sites/51/2023/06/8-JSSM-Volume-18-Number-2-February-2023-FINAL.pdf>.

115. Невмержицький, С. В. Оцінка техногенного впливу викидів стаціонарних джерел на повітряний басейн Житомирської області [Електронний ресурс] / Невмержицький, С. В. // Поліський національний університет. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/13812>.

116. Мединська Н. Впровадження європейських стандартів у сфері екології та енергетики в Україні [Електронний ресурс] / Мединська Н., Маївка М. // Київський національний економічний університет ім. Вадима Гетьмана. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/profile/Khalina-Veronika/publication/371469327_Rozvitok_urbanizovanih_utvoren_na_zasadah_s_talosti/links/648484c8b3dfd73b77799561/Rozvitok-urbanizovanih-utvoren-na-zasadah-stalosti.pdf#page=327

117. Ящук Л. Б. Моніторинг та екологічна оцінка якості атмосферного повітря в Черкаській області [Електронний ресурс] / Л. Б. Ящук, О. В. Педченко // Черкаський Державний Технологічний Університет. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/4249>.

118. Бахарєв В. С. Недосконалість існуючої системи екологічного моніторингу атмосферного повітря на рівні урбосистеми: причини, наслідки, шляхи вдосконалення. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2016. № 5 (100). С. 76–81.

119. Буцик І. В. Оцінка ефективності системи моніторингу якості атмосферного повітря м. Суми [Електронний ресурс] / І. В. Буцик // Сумський державний університет. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/81460>.

120. Ангурець О., Хазан П., Колесникова К. Управління якістю атмосферного повітря: від концепції до впровадження: Звіт за результатами досліджень у редакції М. Сороки. Прага–Київ: Arnika, 2021. 52 с.

121. Рибалова О. В. Потенційний ризик для здоров'я населення при сучасному рівні забруднення атмосферного повітря в індустріальних регіонах України [Електронний ресурс] / О. В. Рибалова, О. В. Бригада, А. В. Горбань // Trend in the development of modern scientific thought. – 2020. – Режим доступу до ресурсу:

https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=NwgLEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA201&dq=%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F+%D0%B0%D1%82%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE+%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%80%D1%8F&ots=IVdzRWeFs&sig=gzY7UWSSq6_tmrSn9h01UtjkWA&redir_esc=y#v=onepage&q=%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%B0%D1%82%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%80%D1%8F&f=false.

122. Рибалова О. В. Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення Харківської області [Електронний ресурс] / О. В. Рибалова, Б. М. Цимбал, К. О. Шевченко // Modern problems in science. – 2020. – Режим доступу до ресурсу:

https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=LOYHEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA200&dq=%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F+%D0%B0%D1%82%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE+%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%80%D1%8F&ots=glxKMaYEp2&sig=LAeZKeFwllXlrwphl2Ufg9WQrn0&redir_esc=y#v=onepage&q=%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%BD%D0%BD%D1%8F+%D0%B0%D1%82%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE+%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%80%D1%8F&f=false.

[B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%B0%D1%82%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%80%D1%8F&f=false.](#)

123. Макаренко Л. І. Якість повітря в сучасних містах і створення безпечного повітряного середовища в житлових та офісних приміщеннях за допомогою очищувачів повітря / Л. І. Макаренко, О. В. Приймак // Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України: тези доповідей IV Міжнародної науково–практичної онлайн–конференції, м. Київ, 10 лютого 2022 року/ редкол. О.С. Волошкіна та ін. – К.: ІТТА, 2022. – 184 с.. – 2022.

124. Ломазов П. К. Розвиток системи моніторингу атмосферного повітря агломерації Дніпро у зв'язку з процесами євроінтеграції. Матеріали XII Всеукраїнської науково–технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна». Секція – екологічні проблеми регіону. 2022 С. 111–113.

125. Бучавий, Ю. В., Павличенко, А. В., & Семеріч, К. В. (2013). Алгоритм багатофакторного моделювання процесів забруднення атмосферного повітря на гірничозбагачувальних комбінатах. ДВНЗ “НГУ”

126. Ломазов П. К., Павличенко А. В. Вплив військових дій на атмосферне повітря на урбанізованих територіях. *Матеріали XIV Міжнародної науково–технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна»* 2024.
https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/167040/Scientific_Spring_2024_91-92.pdf?sequence=1.

127. Куценко М. А., & Алексєєв А. Г. (2020). Оцінка кількості шкідливих речовин в продуктах згорання при пожежі розлитих горючих рідин та екологічних втрат внаслідок такої пожежі. Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/53/44>

128. Хохолик З. (2022). Екологічні загрози застосування ракетного озброєння та боєприпасів. Наука і бізнес: проблеми, перспективи та інновації в умовах воєнного стану.

<http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/47508/1/%D0%A5%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BA%20%D0%97%D0%BE%D1%80%D1%8F%D0%BD%D0%B0.pdf>

129. Про затвердження Порядку утилізації ракет, боєприпасів і вибухових речовин. (2006). Київ. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/812-2006-%D0%BF>

130. Held, M. (1983). TNT – Equivalent. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/rep.19830080507>

131. Ломазов П. К., Павличенко А. В. Удосконалення методологічних підходів до оцінки та прогнозування змін стану довкілля внаслідок воєнних дій. Збірник наукових праць НГУ. – 2024. – № 77 – С. 174 – 183. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.174>

132. Державні будівельні норми України. Планування та забудова територій: ДБН Б.2.2-12:2019 [Електронний ресурс]. – Київ: Мінрегіон України, 2019. – 106 с. – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3022049262482490756/2023-01-23/48e9d4c6-d7fd-470f-b04e-d791c5982967.pdf

133. SCREEN View [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.weblakes.com/software/freeware/screen-view/>

134. ТОВ «Алімар». Генератори дизельні: технічні характеристики моделей серії ALM. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://alimar.com.ua/ua/generatori-dizelni>.

135. Walcom SR-516A [Електронний ресурс]. – Офіційний сайт виробника. – Режим доступу: https://walcom.shop/collections/all?srsId=AfmBOoqJk9FAYk7QYST8PuMmMlbGdnE_rcNBIB30ZmoAlB46JVUBBzkl

136. Tenmars TM-802 Formaldehyde Meter [Електронний ресурс]. – Електронне керівництво користувача / технічна специфікація. – Режим доступу: <https://www.tenmars.com/m/2001-1682-689765%2Cc19118-1.php?Lang=en>

137. Tenmars TM-801 Carbon Monoxide Meter [Електронний ресурс]. – Офіційна веб-сторінка продукту з технічними характеристиками. – Режим доступу: <https://www.tenmars.com/m/2001-1682-689853%2Cc19119-1.php?Lang=en>

138. AZ-7755 CO₂/Temp/RH Meter [Електронний ресурс]. – Офіційне представлення приладу на сайті виробника. – Режим доступу: <https://www.az-instrument.com.tw/en/product-616380/Temp-RH-CO2-Meter-7755-AZ.html>

139. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Про затвердження Порядку інформування населення про якість повітря за основними показниками з використанням індексу якості повітря в Україні: наказ від 24 берез. 2025 р. № 590. Зареєстр. в Мінюсті України 07 квіт. 2025 р. за № 536/43942. – Київ, 2025. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://airindex.eea.europa.eu/AQI/index.html#>.

140. Про затвердження Критеріїв з визначення підприємств, установ і організацій, які мають важливе значення для національної економіки в галузі навколишнього природного середовища в особливий період : Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 16.12.2024 № 1668 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1951-24>

141. Ломазов П. К., Павличенко А. В., Бучавий Ю.В., (2023). Удосконалення методологічних підходів до розвитку системи спостереження за забрудненням атмосферного повітря в агломераціях. Збірник наукових праць НГУ. – 2023. – № 73 – С. 240 – 252. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.240>

142. Кабінет Міністрів України. Про затвердження Національного переліку основних лікарських засобів: Постанова від 20.03.2019 № 827 // Законодавство України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>

143. Nova Fitness SDS011 [Електронний ресурс]. Лазерний датчик концентрації пилу PM_{2.5} і PM₁₀. – Nova Fitness Co., Ltd, 2015. – 11 с. – Режим

доступу: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf>

144. Plantower PMS5003 Digital Laser PM_{2.5} Sensor [Електронний ресурс]. – Plantower Technology Co., Ltd, 2016. – 10 с. – Режим доступу: https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf

145. Alphasense CO-B4 Sensor [Електронний ресурс]. Чотирьохелектродний електрохімічний сенсор оксиду вуглецю CO. – Alphasense Ltd. – Режим доступу: https://ametekcdn.azureedge.net/mediafiles/project/oneweb/oneweb/alphasense/products/datasheets/alphasense_co-b4_datasheet_en_2.pdf

146. Ломазов П. К., Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Оптимізація та удосконалення технічного оснащення стаціонарних постів спостереження за атмосферним повітрям в агломераціях. Збірник наукових праць НГУ. – 2024 – № 78. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.140>

147. Годфрі І., Авард Г., Сібаха Бренес Х. П., Мартінес Крус М., Меграуї К. Використання портативних газоаналізаторів Sniffer4D і SnifferV для моніторингу викидів газів з безпілотних літальних апаратів на вулкані Турріальба, Коста-Рика // Advanced UAV. – 2023. – Т. 3, № 1. – С. 54–90. – URL: <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/uav/article/view/1047>.

148. Ломазов П. К., Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Методи прогнозування забруднення атмосферного повітря на основі машинного навчання. Збірник наукових праць НГУ. – 2025 №79 <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.278>

149. Lakes Environmental Software. Screen View [програма]. Версія SCREEN3, Windows-інтерфейс до EPA SCREEN3. Toronto: Lakes Environmental Software, 2013 [видання 1995–2016]. – Програмна реалізація методики Screening Procedures for Estimating The Air Quality Impact of Stationary Sources (EPA-454/R-92-019, 1995)

150. Zhu, Y., Gao, J., Shi, J., Li, D., Yang, X., & Zhang, J. (2024). *Aerial observation of flare plumes and associated emissions using unmanned aerial vehicles*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(9), 13913–13930. <https://doi.org/10.5194/acp-24-13913-2024>

151. Scentroid. (n.d.). *DR1000 flying laboratory: Drone-based air sampling and analysis platform*. Retrieved April 4, 2025, from <https://scentroid.com/products/analyzers/dr1000-flying-lab/>

152. United States Environmental Protection Agency (EPA). (2023, August 14). *The future of emissions testing: Looking at how EPA is using drones to test air quality*. <https://www.epa.gov/sciencematters/future-emissions-testing-looking-how-epa-using-drones-test-air-quality>)

153. Ломазов П.К., Павличенко А.В., Бучавий Ю.В., “Сучасні підходи до прогнозування якості повітря за допомогою машинного навчання” Ломазов П.К., Павличенко А.В. *Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2025*.

154. Ломазов П. К., Павличенко А. В. «Інтелектуальні методи прогнозування рівня забруднення атмосфери на базі алгоритмів машинного навчання. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. збалансоване природокористування, Львів, Україна, 27 березня 2025. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2025/feb/38049/programakonresu2025.pdf>

155. Shevchenko O.V., Ivanchenko I.P., Petrenko M.S. Review of the State of Air Pollution by Energy Objects in Ukraine // SSRN Electronic Journal. – 2022. – URL: SSRN (дата звернення: 11.06.2025)

156. World Health Organization. 7 million premature deaths annually linked to air pollution. – Geneva: WHO, 25 Mar 2014 – Режим доступу: <https://www.who.int/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у фахових наукових виданнях з переліку МОН України

1. Ломазов П. К., Павличенко А. В., Бучавий Ю.В., (2023). Удосконалення методологічних підходів до розвитку системи спостереження за забрудненням атмосферного повітря в агломераціях. Збірник наукових праць НГУ. – 2023. – № 73 - С. 240 - 252. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.240>

Особистий внесок здобувача – Оцінено динаміку обсягів надходження забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення та автотранспорту. Проведено аналіз діючої системи моніторингу атмосферного повітря агломерації м. Дніпро.

2. Ломазов П. К., Павличенко А. В. Удосконалення методологічних підходів до оцінки та прогнозування змін стану довкілля внаслідок воєнних дій. Збірник наукових праць НГУ. – 2024. – № 77 - С. 174 - 183. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.174>

Особистий внесок здобувача – Проаналізовано види джерел забруднення, що виникають внаслідок воєнних дій. Проаналізовано будову ракетного обладнання та вміст речовин.

3. Ломазов П. К., Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Оптимізація та удосконалення технічного оснащення стаціонарних постів спостереження за атмосферним повітрям в агломераціях. Збірник наукових праць НГУ. – 2024 - № 78. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.140>

Особистий внесок здобувача – Розроблено алгоритм технічного оснащення стаціонарних постів спостереження.

4. Ломазов П. К., Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Методи прогнозування забруднення атмосферного повітря на основі машинного навчання. Збірник наукових праць НГУ. – 2025 №79 <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.278>

Особистий внесок здобувача – Проведено аналіз концентрацій забруднюючих речовин та метеорологічних параметрів. Обґрунтовано

доцільність застосування методів машинного навчання для аналізу і прогнозування часових рядів концентрацій забруднюючих речовин.

5. Ломазов П. К., Бучавий Ю. В. Удосконалення методики прогнозування несприятливих метеорологічних умов для розсіювання забруднювальних речовин в атмосферному повітрі. Збірник наукових праць НГУ. – 2025 №80, 301-314. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.301>

Особистий внесок здобувача – Запропоновано методичні підходи до прогнозування метеорологічних умов та моделювання розсіювання забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери з урахуванням рельєфу, джерел викидів і просторово-часової мінливості погодних факторів.

Матеріали наукових конференцій:

6. Ломазов П. К., Бучавий Ю. В. Розвиток системи моніторингу атмосферного повітря агломерації Дніпро у зв'язку з процесами Євроінтеграції. Матеріали XII Всеукраїнської науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2022. https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/161080/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%9D%D0%92_2022-111-113.pdf?sequence=1

Особистий внесок здобувача – Запропоновано розміщення додаткових постів спостереження за атмосферним повітрям.

7. Ломазов П. К. Взаємозв'язок системи екологічного моніторингу атмосферного повітря та сталого розвитку місцевих громад. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 2022. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/32.pdf>

Особистий внесок здобувача – Проаналізовано Законодавства України та ЄС та переліку викликів, що виникають щодо процесів Євроінтеграції.

8. Ломазов П. К., Павличенко А. В. Впровадження міжнародного досвіду в системи екологічного моніторингу атмосферного повітря в Україні. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та

https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/164011/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%B2%D0%B5%D1%81%D0%BD%D0%B0_2023-114-116.pdf?sequence=1.

Особистий внесок – здійснено аналіз сучасних підходів до визначення зон контролю якості повітря, зокрема європейських практик (на прикладі м. Барселона), узагальнено роль щорічного моніторингу у формуванні державної стратегії зниження викидів.

9. Ломазов П. К., Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Теоретичні основи побудови інформаційно-аналітичних систем в екологічному моніторингу атмосферного повітря. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «МОЛОДЬ: НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ», 22-24 листопада 2023 р. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/165755>

Особистий внесок – опрацьовано теоретичні засади побудови інформаційно-аналітичних систем для цілей моніторингу атмосферного повітря, зокрема проаналізовано структуру, функції та вимоги до таких систем в умовах урбанізованого середовища.

10. Ломазов П. К., Павличенко А. В. Система екологічного моніторингу на гірничих підприємствах. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «МОЛОДЬ: НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ», 22-24 листопада 2023 р. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/166860>.

Особистий внесок – досліджено особливості організації системи моніторингу на гірничих підприємствах та визначено ключові чинники її ефективності.

11. Buchavyi Yu. Development of the environmental monitoring system as a basis for ensuring sustainable development of local communities / Yurii Buchavyi, Pavlo Lomazov // Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities : collection of scientific articles. – Dresden, 2024. – Pp. 84-86.

https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/167801/0%20%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BA%D0%B0%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B9-%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%BB._fin-84-86.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Особистий внесок – обґрунтовано ролі системи моніторингу як інструменту сталого розвитку громад та проаналізовано можливості її інтеграції у місцеві управлінські практики.

12. Ломазов П. К., Павличенко А. В. Вплив військових дій на атмосферне повітря на урбанізованих територіях. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2024. https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/167040/Scientific_Spring_2024-91-92.pdf?sequence=1.

Особистий внесок – проаналізовано вплив військових дій на стан атмосферного повітря в містах, узагальнено основні типи забруднень та джерел, притаманних воєнному часу.

13. Ломазов П. К., Павличенко А. В. «Інтелектуальні методи прогнозування рівня забруднення атмосфери на базі алгоритмів машинного навчання. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. збалансоване природокористування, Львів, Україна, 27 березня 2025. https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2025/feb/38049/programakon_resu2025.pdf

Особистий внесок – досліджено застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування рівня забруднення повітря та визначено найбільш ефективні моделі для моніторингу.

14. Ломазов П.К., Павличенко А.В., Бучавий Ю.В., «Сучасні підходи до прогнозування якості повітря за допомогою машинного навчання» Ломазов П.К., Павличенко А.В. Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2025.

Особистий внесок – опрацьовано сучасні підходи до прогнозування якості повітря із використанням методів машинного навчання, проведено тестування моделей на реальних екологічних даних.

15. Ломазов П.К, Павличенко А.В. «Комплексна оцінка екологічного стану навколишнього середовища в гірничопромислових регіонах» // Матеріали XV Міжнародної науково–технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», секція № 24 «Перспективи освоєння критичної мінеральної сировини в Україні та Європейському Союзі», м. Дніпро, 26–28 березня 2025 р. – Дніпро: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2025.

Особистий внесок – проведено аналіз екологічного стану гірничопромислових регіонів та запропоновано підходи до комплексної оцінки з урахуванням впливу промислових факторів

Додаток Б

Місцезорештування поетів

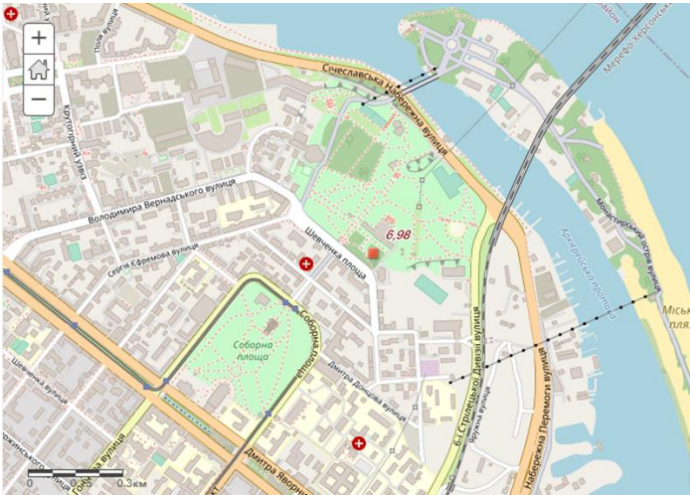


Рисунок Б1 – Пост №10

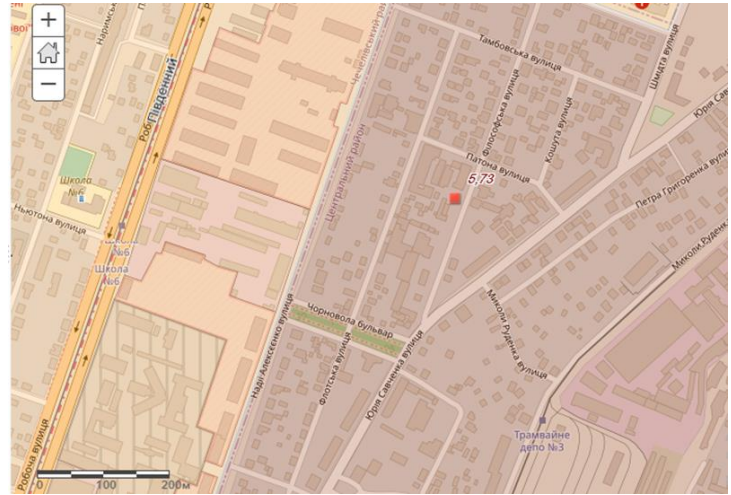


Рисунок Б2 – Пост №13

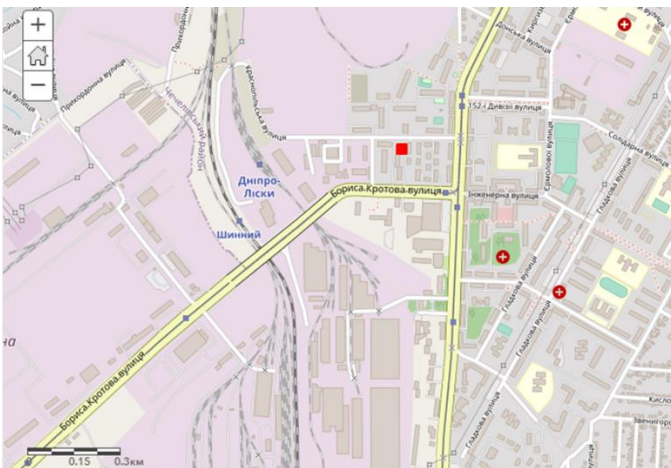


Рисунок Б3 – Пост №19

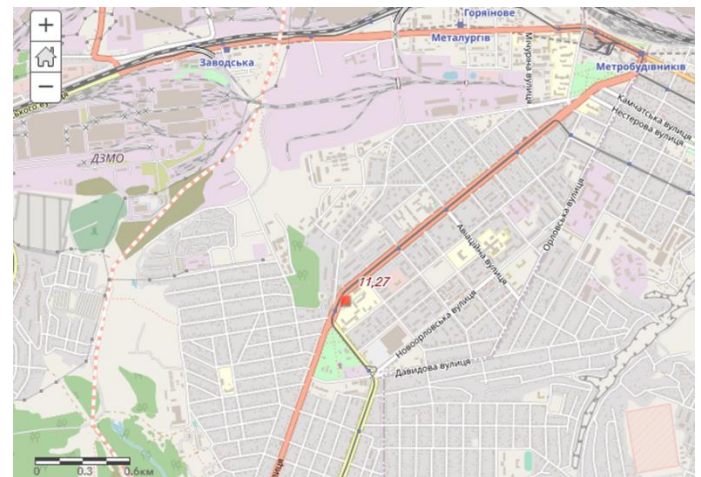


Рисунок Б4 – Пост №20

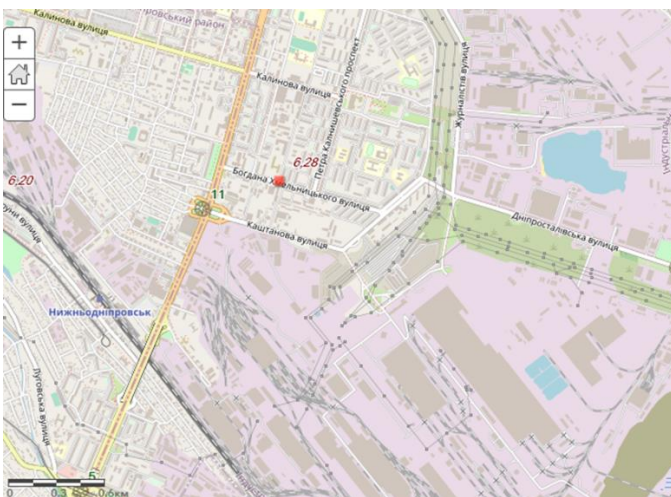


Рисунок Б5 - Пост №24

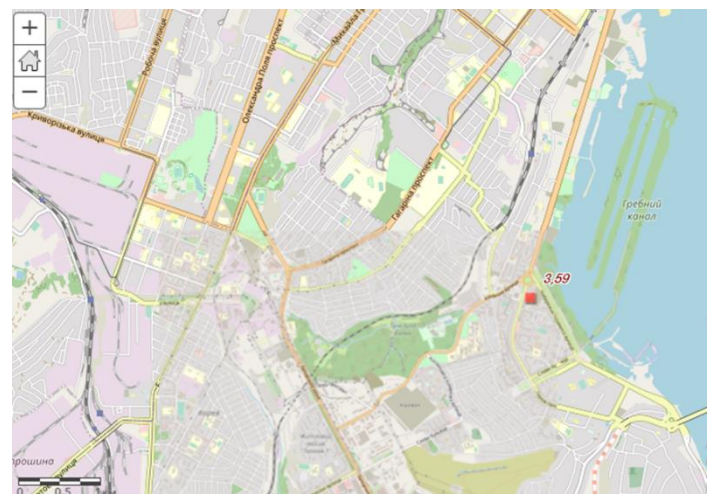


Рисунок Б6 – Пост №25

Додаток В

Шари ГІС середовища ДніпроМАП



Рисунок В1 - Топографічний шар

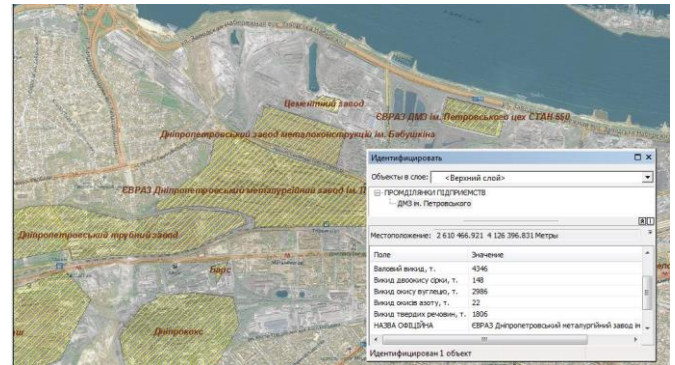


Рисунок В2 – Шар з промисловими об'єктами

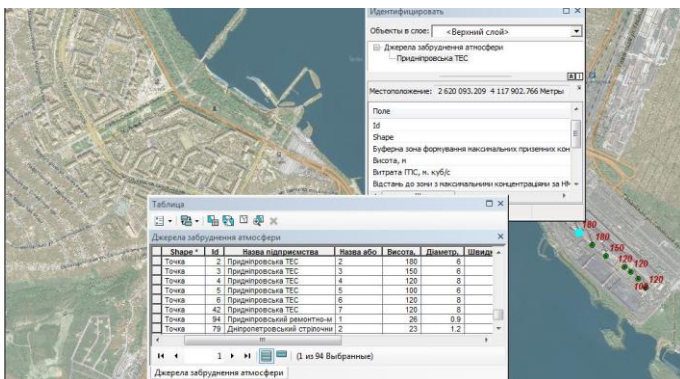


Рисунок В3 –База джерел забруднення атмосферного повітря

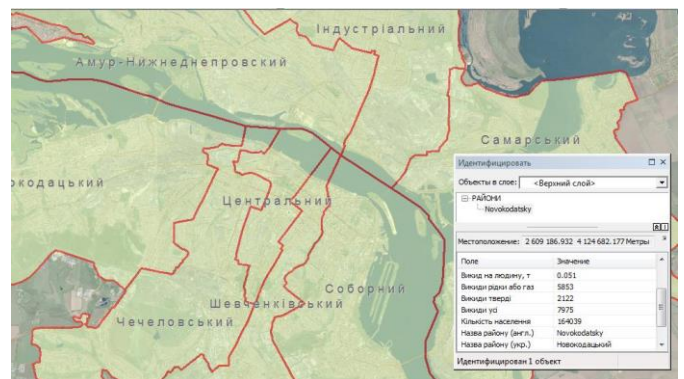


Рисунок В4 – Межі районів міста та їх екологічні параметри

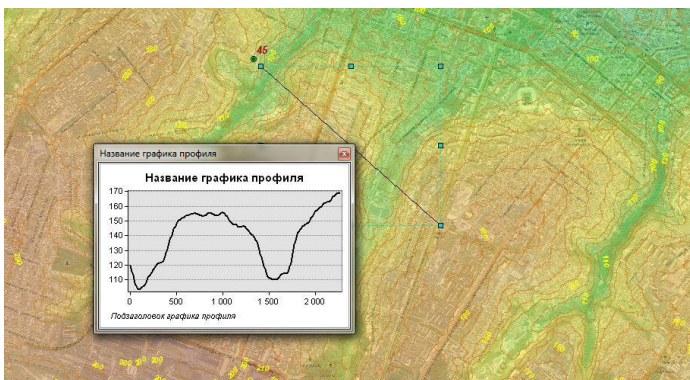


Рисунок В5 – Шар висот: ізолінії та градієнтні профілі

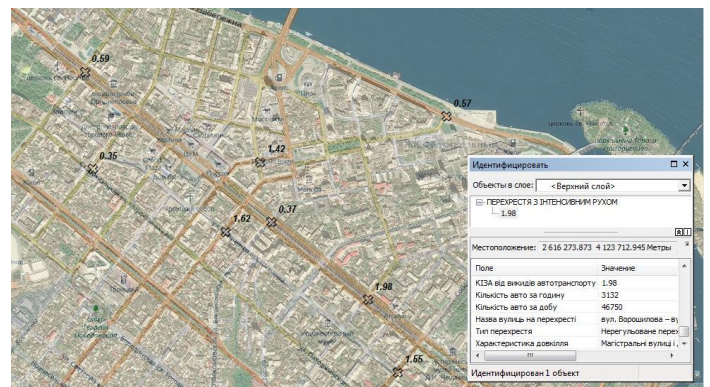


Рисунок 3.6 – Перехрестя з високою інтенсивністю руху та індексами забруднення атмосфери

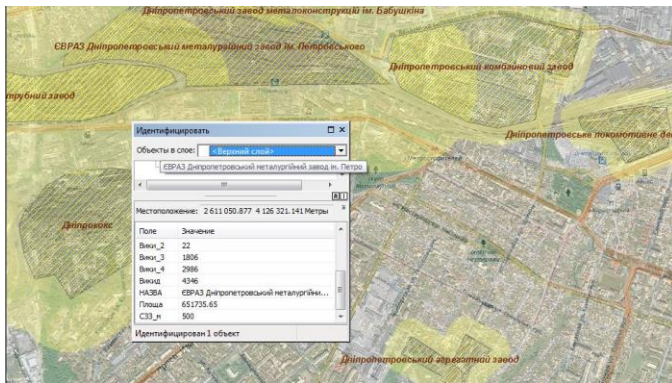
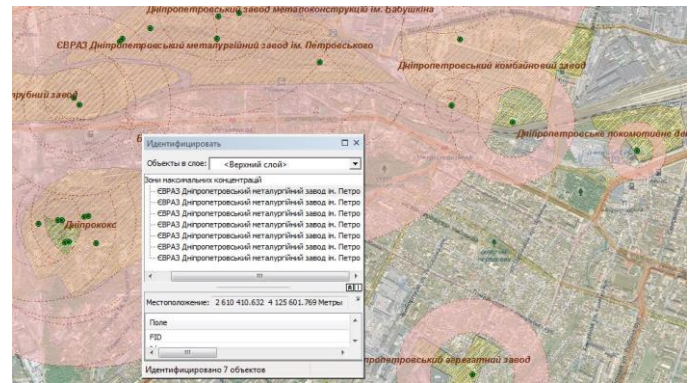


Рисунок В7 – Контури СЗЗ навколо промислових майданчиків



Додаток В8 – Области максимальних концентрацій забруднюючих речовин

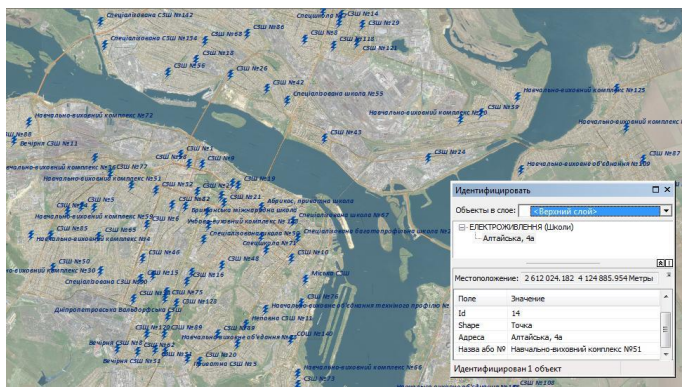
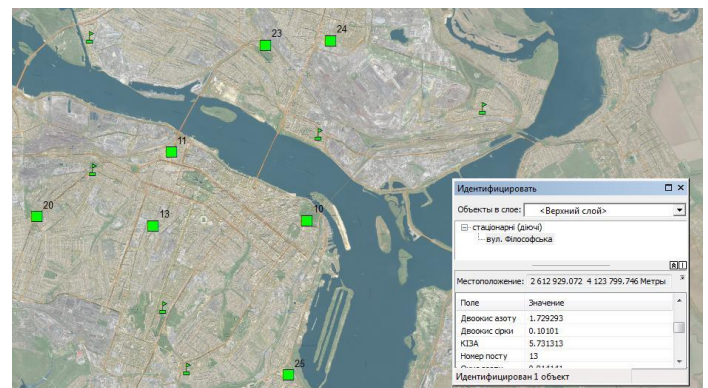


Рисунок В9 – Розташування шкіл як джерел електроживлення



Додаток В10 – Місця спостереження за якістю повітря: поточні та заплановані

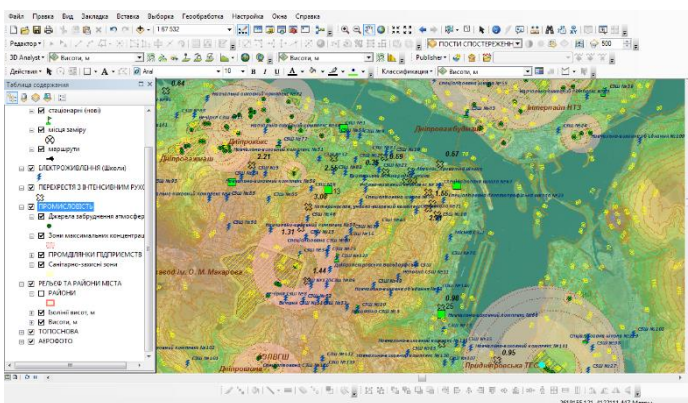


Рисунок В11 – Створення та використання ГІС «ДніпроМАП» у середовищі ArcGIS

Додаток Г

Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи в освітній процес

ДОДАТОК

Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Ректор
НТУ «Дніпровська політехніка»
Азюковський О.О.
"19" 05 2025 р.



ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Ломазова Павло Костянтиновича «Удосконалення системи екологічного моніторингу на промислових комплексах та агломераціях», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії, в навчальному процесі НТУ «Дніпровська політехніка»

У рамках освітньо-наукової діяльності на кафедрі екології та технології захисту навколишнього середовища НТУ «Дніпровська політехніка» впроваджуються результати дисертаційної роботи Ломазова Павла Костянтиновича. Запропоновані в дисертаційній роботі методики обґрунтування локацій для постів спостереження за якістю атмосферного повітря засобами ГІС, технологія розгортання ефективної системи моніторингу атмосферного повітря, а також технологія побудови шляху польоту коптера біля джерел забруднення досліджуваних територій із використанням алгоритму побудови системи моніторингу повітря та встановлення постів спостереження в агломераціях впроваджено у практикуми дисциплін «Моніторинг довкілля», «Екологічна безпека», «Системний аналіз якості навколишнього середовища», «Моделювання екологічних систем і процесів», «Геоінформаційні технології захисту довкілля».

Матеріали дисертаційної роботи також використовуються при виконанні курсових і кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів, а також у лабораторних дослідженнях студентами спеціальностей 101 «Екологія» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища».

Зав. кафедри екології
та технологій захисту
навколишнього середовища,
к.т.н., доцент



Борисовська О.О.

Додаток Г

**Довідка про впровадження результатів дисертаційного дослідження,
департамент екологічної політики ДМР****ДНІПРОВСЬКА МІСЬКА РАДА
ДЕПАРТАМЕНТ ЕКОЛОГІЧНОЇ ПОЛІТИКИ**

просп. Дмитра Яворницького, 75, м. Дніпро, 49000,
тел. 744 25 00, e-mail: ecorol@dmr.dp.ua ЄДРПОУ 41156601

17.06.2015 № 7/11-130

На № _____ від _____

ДОВІДКА

Матеріали дисертаційної роботи аспіранта Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Ломазова Павла Костянтиновича на тему «Удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій» за спеціальністю 183 – «Технології захисту навколишнього середовища» рекомендовані до використання в екологічній діяльності міста Дніпро – у сфері моніторингу атмосферного повітря.

У межах реалізації результатів дисертаційної роботи в практичну діяльність департаменту екологічної політики Дніпровської міської ради було впроваджено нові підходи до організації системи моніторингу атмосферного повітря агломерації Дніпро. Зокрема, застосовано методику обґрунтування місць розташування постів спостереження із використанням геопросторового аналізу розрахункових концентрацій забруднюючих речовин від викидів підприємств і врахування фактору щільності населення, удосконалено механізми аналізу стану повітряного середовища та системи інформування населення про небезпеку від забруднення атмосферного повітря, розширено перелік необхідного технічного обладнання для контролю забруднюючих речовин з урахуванням умов воєнного часу, а також запроваджено прогнозування змін якості повітря на основі алгоритмів машинного навчання.

Матеріали досліджень застосовувалися при розробці Програми державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря агломерації «Дніпро» на 2022 – 2026 роки, затверджену рішенням Дніпровської міської ради №8/26 від 17.08.2022.

Запропоновані в дисертаційній роботі рішення є корисними та перспективними при оновленні міських екологічних програм, що дозволяє міським службам оперативно реагувати на загрози техногенного характеру, ефективно управляти екологічними ризиками та підвищувати загальний рівень екологічної безпеки міста.

Таким чином, результати дослідження набули практичного значення і сприяють покращенню стану атмосферного повітря у місті Дніпро, що відповідає цілям сталого розвитку та міжнародним стандартам у сфері охорони довкілля.

Директор департаменту

Олег СЕМЕНКО

Додаток Д

**Довідка про впровадження результатів дисертаційного дослідження,
департамент екології та природних ресурсів Дніпропетровської ОВА**



ДНІПРОПЕТРОВСЬКА ОБЛАСНА ВІЙСЬКОВА АДМІНІСТРАЦІЯ

ДЕПАРТАМЕНТ ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ

вул. Лабораторна, 69, м. Дніпро, 49000, тел./факс. (0562) 46-41-61,
e-mail: ecology@adm.dp.gov.ua, код ЄДРПОУ 38752461

ДОВІДКА

Матеріали дисертаційної роботи аспіранта Національного технічного університету “Дніпровська політехніка” Ломазова Павла Костянтиновича на тему: “Удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря муніципальних промислових комплексів та агломерацій” за спеціальністю 183 “Технології захисту навколишнього середовища” рекомендовані до практичного використання в сфері моніторингу атмосферного повітря.

Запропоновані технологічні рішення щодо розгортання ефективної системи моніторингу атмосферного повітря є актуальними як для потреб окремих агломерацій, так і Дніпропетровської зони. Зазначена система моніторингу дає змогу враховувати просторові особливості розподілу джерел забруднення та здійснювати управління якістю повітря на різних адміністративних рівнях.

Також практичну цінність становлять оновлені підходи до структурування джерел забруднення повітря в умовах воєнного часу. Це дозволяє точніше ідентифікувати джерела підвищеної небезпеки для довкілля та здоров'я населення, а також включити до постійного контролю речовини, що не охоплювались чинними нормативами, але актуалізувались через військові дії.

Прикладне значення результатів становлять алгоритмічні підходи до розрахунку індексів якості повітря та прогнозування змін його стану, що сприяє підвищенню ефективності прийняття рішень у сфері управління станом атмосферного повітря.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використанні органами управління якості атмосферного повітря при розробці заходів щодо поліпшення стану атмосферного повітря.

Директор департаменту



Яна НАУМЕНКО

Дніпропетровська обласна державна адміністрація
Департамент екології та природних ресурсів ДООА
Вих. № 3-2424/0/261-25 від 17.06.2025



Додаток Е

Алгоритм розгортання багаторівневої системи моніторингу атмосферного повітря

