

Хмельницький національний університет
Гуманітарно-педагогічний факультет
Кафедра екології та біологічної освіти

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти

Оптимізація системи державного моніторингу атмосферного повітря
агломерації «Хмельницький»

Галузь знань – 10 «Природничі науки»
Спеціальність – 101 «Екологія»

ДРЕКОЛ. 023186.01.04.00

Виконала: здобувачка 2 курсу групи ЕКОЛм-23-1  Яна ГУРОВСЬКА

Керівник  Наталія МІРОНОВА

Нормоконтролер  Сергій ШЕВЧЕНКО

До захисту допускаю:
завідувач кафедри екології
та біологічної освіти


Ольга ЄФРЕМОВА


18 грудня 2024 р.

Хмельницький 2024

Факультет – Гуманітарно-педагогічний
Кафедра – Екології та біологічної освіти
Освітній рівень – другий (магістерський)
Галузь знань – 10 «Природничі науки»
Спеціальність – 101 «Екологія»
Освітньо-професійна програма – «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри екології
та біологічної освіти

 Ольга ЄФРЕМОВА
18 жовтня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Гуровській Яні Олександрівні

1. Тема роботи «Оптимізація системи державного моніторингу атмосферного повітря агломерації «Хмельницький» »

керівник роботи Міронова Наталія Геннадіївна, доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри.

Затверджено наказом ректора університету від 26 серпня 2024 р. № 60

2. Строк подання здобувачем роботи на кафедру 16 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи грунтово-кліматична та екологічна характеристика, дані щодо забруднення атмосферного повітря міста Хмельницького.

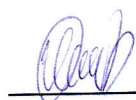
4. Зміст роботи 1. Характеристика забруднення атмосферного повітря в урбоекосистемах. 2 Аналіз систем моніторингу атмосферного повітря: національний та міжнародний досвід. 3 Дослідження системи моніторингу атмосферного повітря агломерації «Хмельницький».

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу (розділу) кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапу роботи	Примітка
1	Визначення об'єкта і предмета дослідження, постановка мети і завдань відповідно до теми кваліфікаційної роботи, формулювання актуальності та гіпотези дослідження. Оформлення вступу	до 01.11	виконано
2	Розділ I. Характеристика забруднення атмосферного повітря в урбоекосистемах	до 15.11	виконано
3	Розділ II. Аналіз систем моніторингу атмосферного повітря: національний та міжнародний досвід	до 20.11	виконано
4	Розділ III. Дослідження системи моніторингу атмосферного повітря агломерації «Хмельницький»	до 08.12	виконано
5	Загальні висновки	до 10.12	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	до 15.12	виконано
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи	17.12	виконано
8	Захист кваліфікаційної роботи (відповідно графіку)	24.12	виконано

Дата видачі завдання: 21 жовтня 2024 р.

Здобувачка



Яна ГУРОВСЬКА

Керівник



Наталія МІРОНОВА

АНОТАЦІЯ

Тема – Оптимізація системи державного моніторингу атмосферного повітря агломерації «Хмельницький».

Автор – здобувачка ЕКОЛМ-23-1 Яна ГУРОВСЬКА.

Керівник – доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри Наталія МІРОНОВА.

Кваліфікаційна робота викладена на 81 сторінці, містить 8 рисунків, 1 таблицю, перелік джерел посилань, що включає 54 джерела.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АГЛОМЕРАЦІЯ «ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ», АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ, ДЕРЖАВНИЙ МОНІТОРИНГ, ЗАБРУДНЮЮЧІ РЕЧОВИНИ.

У роботі охарактеризовано існуючі системи моніторингу в Україні та за кордоном, їх переваги та недоліки, представлено особливості системи моніторингу атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький», наведені результати вимірювання забруднення пиловими частинками на основних вулицях міста, запропоновані напрями вдосконалення системи моніторингу атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький».

16.12.2024



Яна ГУРОВСЬКА

ЗМІСТ

	С.
Перелік умовних позначень.....	5
Вступ.....	6
1 Характеристика забруднення атмосферного повітря в урбоекосистемах.....	8
1.1 Історичний екскурс у проблему забруднення атмосферного повітря.....	8
1.2 Характеристика джерел забруднення та забруднюючих речовин	10
2 Аналіз систем моніторингу атмосферного повітря: національний та міжнародний досвід.....	22
2.1 Системи державного та громадського моніторингу атмосферного повітря в Україні.....	22
2.2 Досвід функціонування системи моніторингу атмосферного повітря в країнах ЄС, Азії та США.....	34
3 Дослідження системи моніторингу атмосферного повітря агломерації «Хмельницький».....	45
3.1 Характеристика агломерації «Хмельницький».....	45
3.2 Аналіз системи державного моніторингу в галузі атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький» та його реалізації.....	49
3.3 Напрямки оптимізації системи державного моніторингу для агломерації «Хмельницький».....	54
Висновки.....	62
Перелік джерел посилання.....	65
Додаток А. Результати апробації роботи.....	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CAMS – copernicus atmosphere monitoring service (служба моніторингу атмосфери Коперника);

PM – particulate matter (тверді частинки);

ВООЗ – всесвітня організація охорони здоров'я;

ДСМ – державна система моніторингу;

ЛОС – леткі органічні сполуки;

ШІ – штучний інтелект.

ВСТУП

Атмосферне повітря є одним із найбільш важливих компонентів природного середовища, що визначає умови життєдіяльності людини, стан флори і фауни, а також рівень загальної екологічної безпеки регіонів. В останні десятиліття проблема забруднення атмосферного повітря набула глобального масштабу, адже зі зростанням урбанізації, інтенсифікацією промислового виробництва, збільшенням автомобільного парку та іншими антропогенними факторами суттєво погіршується його якість. Хмельницька агломерація, яка є регіональним центром із розвинутою транспортною та промисловою інфраструктурою, не є винятком із цієї тенденції. Така ситуація вимагає оперативного та точного моніторингу, який дозволив би своєчасно оцінювати стан повітря та приймати управлінські рішення щодо зменшення рівня забруднення.

Метою магістерської роботи є рекомендації щодо оптимізації системи державного моніторингу атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький»,

Завдання роботи:

– охарактеризувати основні джерела забруднення атмосферного повітря в урбоекосистемах;

– проаналізувати системи моніторингу в Україні та за кордоном;

– вивчити особливості системи моніторингу атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький» та розробити рекомендації щодо її вдосконалення.

Об'єктом дослідження є система моніторингу атмосферного повітря.

Предметом дослідження є особливості, ефективність та шляхи оптимізації державного моніторингу атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький».

Гіпотеза дослідження – оптимізація системи моніторингу атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький» сприятиме ефективному виявленню зон підвищеного забруднення та дозволить розробити дієві заходи для їх усунення.

Методи дослідження: аналіз, синтез, порівняння, польові вимірювання концентрації пилу, картографічний аналіз.

Інноваційність магістерської роботи полягає в оптимізації системи моніторингу якості атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький» шляхом впровадження в систему пересувних постів спостереження, що забезпечують можливість оперативного проведення вимірювань у різних частинах міста, зокрема на ділянках із підвищеним рівнем забруднення.

Практичне значення роботи: результати роботи можуть бути використані органами місцевого самоврядування для оптимізації державної системи моніторингу атмосферного повітря та управління якістю повітря. Розроблена карта забруднення дисперсними частинками надасть можливість визначити найбільш критичні точки в міській екосистемі, що сприятиме ефективному плануванню заходів з покращення стану атмосферного повітря.

Апробація результатів роботи і публікації з теми дослідження. Апробація на Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Подільські читання. Дослідження, охорона довкілля та збереження біотичного та ландшафтного різноманіття, природнича освіта», 21-22.11.2024 р., м. Кам'янець-Подільський. Публікація: Гуровська Я.О. Оптимізація системи державного моніторингу атмосферного повітря агломерації «Хмельницький» / Н. Г. Міронова, Я. О. Гуровська // Подільські читання. Дослідження, охорона довкілля та збереження біотичного та ландшафтного різноманіття, природнича освіта: зб. за матер. Всеукр. наук.-практ. конфер. з міжнар. участю (21- 22 листопада 2024 р., Кам'янець-Подільський) / [за заг. ред. Н. В. Казанішеної]. [Електронний ресурс]. Кам'янець-Подільський : КПНУ ім. І. Огієнка, 2024. 460 с.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УРБООКОСИСТЕМАХ

1.1 Історичний екскурс у проблему забруднення атмосферного повітря

Забруднення атмосферного повітря напряму пов'язане з розвитком людської цивілізації. У ранні епохи діяльність людини мала мінімальний вплив на довкілля, проте зі зростанням чисельності населення, урбанізацією та промисловою революцією масштаби забруднення значно зросли.

У період античності та середньовіччя забруднення повітря було переважно локальним. Основними джерелами забруднення виступали деревина, яка використовувалася для опалення та приготування їжі, а також обробка металів. У Стародавньому Римі великі промислові центри, зокрема ті, що займалися виплавою металів, спричиняли значне забруднення довкілля. Археологічні дослідження показали, що навіть льодовики у Гренландії містять шари свинцю, що утворилися внаслідок металургійної діяльності римлян [1].

У середньовічній Європі забруднення атмосферного повітря залишалося проблемою міст. Використання вугілля для опалення, особливо в Лондоні, призводило до появи густого диму, що забруднював повітря. У 1273 році король Англії Едуард I вперше заборонив використання вугілля у межах міста через його шкідливий вплив на здоров'я мешканців [2].

Промислова революція XVIII-XIX століть стала переломним моментом у формуванні проблеми забруднення повітря. Швидкий розвиток промисловості, інтенсивне використання вугілля та будівництво великих фабрик призвели до різкого погіршення якості повітря. Техногенні викиди, які містили сажу, оксиди сірки та важкі метали, стали основними забруднювачами того періоду. Зростання урбанізації збільшило концентрацію джерел забруднення у великих містах.

Одним із перших задокументованих прикладів масштабного забруднення є «смог у Лондоні» 1952 року, коли через поєднання диму від вугільних котелень і несприятливих погодних умов утворився густий туман, що спричинив тисячі смертей. Ця трагедія привернула увагу до необхідності законодавчого регулювання якості повітря. У 1956 році був ухвалений перший закон «Про чисте повітря», який обмежив використання вугілля у житлових районах [3].

У ХХ столітті основними джерелами забруднення стали автомобільний транспорт, промислові підприємства та спалювання відходів. Інтенсивне використання викопного палива в автомобілях, зокрема бензину й дизельного пального, призвело до зростання викидів оксидів азоту, чадного газу та дрібнодисперсних частинок.

У 1970-ті роки глобальна екологічна спільнота почала активно боротися із забрудненням атмосферного повітря. Прийняття Директиви Європейського Союзу про якість повітря та створення Агентства з охорони навколишнього середовища у США стали ключовими кроками до розв'язання цієї проблеми.

Історичний досвід показує, що забруднення атмосферного повітря є багатовіковою проблемою, яка виникла разом із розвитком технологій і промисловості. У сучасний період, завдяки впровадженню екологічного законодавства та інноваційних технологій, існують реальні можливості для значного скорочення викидів, що особливо важливе для умов урбоєкосистем [4].

Урбоєкосистеми – це екосистеми, що виникають у межах населених пунктів. Вони відрізняються від природних екосистем значним антропогенним навантаженням, зумовленим діяльністю людини, що призводить до зміни природних процесів, якості повітря, водних ресурсів та ґрунтів. Урбоєкосистеми характеризуються високою щільністю населення, інтенсивним розвитком промисловості, транспортною інфраструктурою та високим енергоспоживанням. Внаслідок цього атмосфера у містах зазнає значного навантаження, пов'язаного із забрудненням [5].

1.2 Характеристика джерел забруднення та забруднюючих речовин

Атмосферне повітря є важливою складовою навколишнього середовища і являє собою природну суміш газів, що знаходиться за межами житлових, виробничих та інших приміщень.

Забруднення атмосферного повітря – це зміни складу або властивостей повітря в атмосфері в результаті надходження або утворення фізичних, біологічних факторів та/або хімічних сполук, які можуть негативно впливати на здоров'я людини або навколишнє природне середовище [6].

Згідно із Законом України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», одним з найгостріших викликів для довкілля в нашій країні залишається забруднення повітря. Незважаючи на загальне скорочення виробництва, стан повітря у великих містах та промислових зонах України продовжує викликати серйозну стурбованість. Рівень шкідливих речовин в атмосфері перевищує допустимі норми, що негативно впливає на здоров'я людей та стан екосистем [7].

Забруднення атмосферного повітря може бути як природним, так і штучним (антропогенним), природне забруднення повітря відбувається без участі людини і включає викиди речовин, які є результатом природних процесів, а штучне є наслідком людської діяльності, і воно має значно більший вплив на якість повітря (таблиця 1.1) [8].

Джерела можна поділити на стаціонарні та пересувні. Кожен з цих типів має свою специфіку та особливості, що визначають його вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей.

Стаціонарні джерела забруднення – це ті, що мають постійне місце розташування. Ці об'єкти можуть бути значними джерелами забруднення повітря, оскільки вони працюють на великих потужностях і часто розташовані в густонаселених районах або поблизу важливих промислових центрів.

Таблиця 1.1 – Джерела забруднення атмосферного повітря та їх вплив на довкілля та здоров'я людини

Категорія	Джерела забруднення	Основні забруднювачі	Вплив на довкілля та здоров'я людини
1	2	3	4
Природні	Пилові бурі	Пил, аерозолі	Погіршення видимості, проблеми з диханням
	Вулканізм	Вулканічний попіл, сірчистий газ (SO ₂)	Кислотні дощі, забруднення повітря, кліматичні зміни
	Лісові пожежі	Частинки сажі, оксиди вуглецю (CO), діоксини	Забруднення повітря, погіршення якості води, втрата біорізноманіття
	Вивітрювання гірських порід	Пил	Забруднення повітря, замулення водойм
	Розкладання органічних речовин	Метан (CH ₄), аміак (NH ₃)	Парниковий ефект, забруднення водойм
Штучні (антропогенні)	Промислові підприємства	Оксиди сірки (SO _x), азоту (NO _x), вуглецю (CO _x), важкі метали, органічні сполуки	Кислотні дощі, смог, отруєння, ракові захворювання

Кінець таблиці 1.1

1	2	3	4
	Транспорт	Оксиди азоту (NO _x), вуглецю (CO _x), тверді частинки, вуглеводні	Смог, проблеми з диханням, серцево-судинні захворювання
	Теплоенергетика	Оксиди сірки (SO _x), азоту (NO _x), вуглецю (CO _x), пил	Кислотні дощі, парниковий ефект
	Опалювання житла	Оксиди вуглецю (CO), тверді частинки	Отруєння, проблеми з диханням
	Сільське господарство	Аміак (NH ₃), метан (CH ₄), пестициди	Забруднення ґрунтів і вод, парниковий ефект

Основними стаціонарними джерелами є промислові підприємства, заводи, фабрики, хімічні та металургійні виробництва, теплоелектростанції та інші великі об'єкти, що використовують енергетичні ресурси. Наприклад, у процесі виробництва металів або хімічних речовин в атмосферу викидаються діоксиди сірки, оксиди азоту, важкі метали, а також органічні сполуки, що можуть мати значний вплив на здоров'я людей і навколишнє середовище. Теплоелектростанції, що використовують викопне паливо для виробництва енергії, також є потужними джерелами забруднення, виділяючи в атмосферу вуглекислий газ, оксиди сірки та азоту. Це не лише забруднює повітря, а й сприяє зміні клімату через підвищення концентрації парникових газів.

Іншим прикладом стаціонарних джерел є сміттєпереробні заводи, які, особливо в разі спалювання відходів, можуть виділяти в атмосферу токсичні речовини, зокрема діоксини та фурані, що є канцерогенними саолуками. Також великі фермерські господарства та птахофабрики можуть бути

джерелами забруднення повітря, оскільки в процесі їх діяльності викидаються аміак, метан, а також пил і пестициди [9].

Пересувні джерела забруднення, на відміну від стаціонарних, не мають фіксованого місця розташування і здатні змінювати своє місце перебування. Ці джерела забруднення включають транспортні засоби, такі як автомобілі, автобуси, вантажівки, мотоцикли, а також літаки, поїзди і кораблі.

Автомобільний транспорт є одним з найбільших забруднювачів атмосферного повітря, особливо у великих містах, де висока концентрація транспорту. Викиди з автомобілів містять оксиди азоту, вуглекислий газ, чадний газ, вуглеводні, а також дрібні частинки, які можуть проникати в легені людини та спричиняти респіраторні захворювання. Оскільки транспорт постійно рухається, його забруднення може поширюватись на великі території, що робить його однією з найбільш значущих екологічних проблем у містах.

Авіаційний транспорт також є значним джерелом забруднення, зокрема його вплив особливо проявляється на великих висотах, де викиди продуктів спалювання пального знижують якість повітря і сприяють змінам клімату.

Залізничний транспорт у меншому ступені забруднює атмосферне повітря порівняно з автомобілями чи літаками. Разом з тим, він також є потужним забруднювачем через викиди від дизельних двигунів або електричних станцій, що постачають енергію на електрифіковані ділянки залізничних магістралей.

Пересувні джерела забруднення характеризуються мобільністю, що дозволяє їм впливати на різні території. Таким чином, вони можуть спричиняти забруднення на великих відстанях і мати значний вплив на якість повітря в зонах з інтенсивним рухом транспорту [10].

Забруднення атмосферного повітря є одним з визначних факторів ризику для здоров'я міського населення. Дрібнодисперсні частинки пилу можуть проникати глибоко в легені та кровоносну систему, спричиняючи захворювання серцево-судинної системи.

Дослідження Всесвітньої організації охорони здоров'я свідчать, що довготривалий вплив забрудненого повітря підвищує ризик розвитку раку легень, хронічної обструктивної хвороби легень та астми. Для дітей забруднення може мати критичні наслідки, включаючи уповільнення розвитку легеневої системи [11].

До основних забруднювачів повітря належать:

– тверді частинки (particulate matter, PM) є одними з найпоширеніших забруднювачів повітря, вони поділяються за розміром на PM10 (частинки діаметром до 10 мікрон) і PM2.5 (до 2.5 мікрон). Ці частинки мають як природне, так і антропогенне походження. До природних джерел утворення цих частинок належать пилові бурі, виверження вулканів, лісові пожежі, до антропогенних – транспорт, спалювання викопного палива, промисловість та будівельна діяльність. PM10 зазвичай осідають у верхніх дихальних шляхах, викликаючи подразнення слизових оболонок, алергічні реакції та захворювання, такі як бронхіт або синусит. PM2.5 небезпечніші, оскільки можуть проникати глибоко в легені та навіть потрапляти в кровотік, що підвищує ризик серцево-судинних хвороб, інсультів та онкологічних захворювань. Дослідження Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) вказують на те, що довготривале вдихання PM2.5 значно збільшує смертність від респіраторних та серцевих хвороб [12];

– оксиди азоту (NO_x) є головними забруднювачами, що утворюються внаслідок роботи двигунів внутрішнього згоряння, електростанцій та промисловості. Вони не тільки безпосередньо шкодять здоров'ю людини, але й є джерелами вторинного забруднення. NO_x викликають подразнення слизових оболонок дихальних шляхів, можуть сприяти розвитку астми, бронхіту, а також погіршувати стан людей із серцево-судинними захворюваннями. Крім того, реакція NO_x із водяною парою утворює кислотні дощі, що призводить до деградації екосистем: закислення ґрунтів, загибелі водних організмів у водоймах, руйнування будівельних матеріалів та пам'яток архітектури;

– оксиди сірки (SO_x), зокрема діоксид сірки (SO_2), утворюються під час спалювання вугілля та інших викопних палив. Вони можуть викликати подразнення очей, кашель, а також захворювання дихальної системи. Подібно до NO_x , вони утворюють кислотні дощі, які мають руйнівний вплив на довкілля та інфраструктуру [13];

– ЛОС – це група хімічних сполук, які легко випаровуються за кімнатної температури. Основними джерелами ЛОС є автомобільний транспорт та промисловість. ЛОС є попередниками фотохімічного смогу, що виникає під дією сонячного випромінювання. Багато ЛОС є токсичними та канцерогенними. Наприклад, бензол пов'язаний із підвищеним ризиком розвитку лейкемії. Крім канцерогенності, ЛОС негативно впливають на центральну нервову систему, спричиняючи головний біль, нудоту, втому та дратівливість. Бензол також впливає на репродуктивну функцію та здатен накопичуватися в організмі, підвищуючи ризик хронічних захворювань. Дослідження вказують не те, що в умовах високої концентрації ЛОС в урбоекосистемах рівень утворення озону в приземному шарі атмосфери зростає, що погіршує якість повітря та спричиняє проблеми зі здоров'ям [14];

– вуглекислий газ (CO_2) – це основний парниковий газ, що виділяється внаслідок діяльності людини. Його концентрація в атмосфері значно зросла з часів промислової революції, головним чином через спалювання викопного палива, вирубку лісів і зміни в землекористуванні. CO_2 не має прямого токсичного впливу на здоров'я людини у звичайних концентраціях, але його роль у посиленні парникового ефекту робить його одним із головних чинників глобальної зміни клімату. Зростання температур спричиняє екстремальні погодні явища, підвищення рівня моря, втрату біорізноманіття та негативно впливає на сільське господарство. Підвищення концентрації CO_2 також негативно впливає на Світовий океан, спричиняючи закислення води у водних об'єктах, що

відповідно загрожує водним екосистемам зміною гідротопу та зменшенням біорізноманіття гідроценозів.

Основні забруднювачі повітря мають комплексний вплив на довкілля та здоров'я людини. Їх ефекти варіюються від локальних проблем, таких як респіраторні захворювання, до глобальних викликів, зокрема зміни клімату. Для ефективного зменшення рівня вмісту цих забруднювачів необхідні скоординовані заходи на рівні держави, промисловості та суспільства [15].

Забруднене повітря негативно впливає не лише на здоров'я людей, але й на рослинний світ, який є важливою складовою екосистем. Рослини виконують численні екологічні функції: поглинають вуглекислий газ, виділяють кисень, регулюють мікроклімат та сприяють очищенню атмосфери. Однак вони є надзвичайно чутливими до забруднюючих речовин, таких як оксиди сірки, азоту, приземний озон, важкі метали та дрібнодисперсні частинки. Наслідки впливу забруднювачів можуть бути як швидкими, так і тривалими, залежно від їх концентрації та тривалості дії.

Одним із найбільш помітних ефектів є гострі зміни у стані рослин. При високій концентрації забруднюючих речовин у повітрі спостерігається пожовтіння листя (хлороз), яке виникає через руйнування хлорофілу – пігменту, необхідного для фотосинтезу. У результаті рослини втрачають здатність синтезувати органічні речовини, що впливає на їхній ріст та розвиток. Крім того, забруднювачі можуть викликати некроз тканин листя – відмирання клітин, яке проявляється у вигляді коричневих або чорних плям. Такі пошкодження часто спричиняють оксиди сірки та приземний озон, які проникають через продиhi у листові тканини, пошкоджуючи їх структури. Також спостерігається скручування стебел, деформація плодів та опадання листя, що зменшує площу листової поверхні та порушує транспірацію.

Хронічний вплив забрудненого повітря має тривалі наслідки. Рослини, які постійно перебувають під впливом низьких концентрацій шкідливих речовин,

демонструють уповільнення росту та зменшення врожайності. Наприклад, вплив оксидів азоту та кислотних дощів призводить до закислення ґрунтів, що порушує засвоєння рослинами поживних речовин. Також дослідження показують, що тривалий вплив приземного озону знижує ефективність фотосинтезу, що є критичним для життєздатності рослин [16].

Окрему загрозу для рослин становлять важкі метали, такі як свинець, кадмій та мідь. Ці речовини можуть накопичуватися у тканинах рослин, порушуючи їх метаболізм і блокуючи роботу ферментів. У високих концентраціях важкі метали викликають гальмування росту, порушення обміну речовин і навіть загибель рослин. Наприклад, свинець порушує водний баланс у рослинах, а кадмій впливає на синтез білків, необхідних для розвитку клітин.

Дрібнодисперсні частинки, такі як пил, сажа або дим, осідаючи на листках, блокують продихи – отвори, через які відбувається газообмін і випаровування вологи. Це призводить до зниження транспірації та фотосинтетичної активності, що послаблює рослини та робить їх більш вразливими до стресових умов. Крім того, тверді частинки здатні переносити інші забруднюючі речовини, такі як важкі метали чи органічні сполуки, що підвищує ризики їхнього токсичного впливу [17].

Рослини є важливими елементами екосистем, і вони виконують численні функції в природі, зокрема можуть служити індикаторами якості повітря.

Багато видів рослин мають високу чутливість до змін в навколишньому середовищі, зокрема до рівня забруднення атмосферного повітря. Завдяки цьому, вивчення їхнього стану та росту може надати важливу інформацію про рівень забруднення повітря в різних умовах. Особливо корисними у цьому контексті є лишайники, мохи, папороті та сільськогосподарські культури. Лишайники є одними з найчутливіших природних індикаторів якості повітря, оскільки вони здатні акумулювати і реагувати на зміни концентрації забруднювачів, особливо оксидів сірки. Лишайники – це симбіотичні організми, що складаються з

водоростей і грибів, і не мають кореневої системи, тому здатні безпосередньо поглинати речовини з атмосфери. Їхній стан може багато сказати про рівень забруднення навколишнього середовища. Зокрема, у міських районах або інших зонах з високим рівнем забруднення повітря, де концентрація оксидів сірки значна, лишайники зазвичай не ростуть або їхня кількість значно зменшена. Це пояснюється тим, що сірка негативно впливає на їхню життєдіяльність, інгібуючи процеси фотосинтезу і спричиняючи їх загибель. Таким чином, відсутність лишайників на деревах або інших поверхнях є яскравим індикатором високого рівня забруднення повітря.

Мохи та папороті також є корисними індикаторами якості повітря, оскільки вони здатні акумулювати важкі метали та інші забруднювачі. Ці рослини, зокрема мохи, які ростуть у вологих і тіньових місцях, можуть абсорбувати токсичні елементи з атмосфери і таким чином служити природними біоіндикаторами забруднення, особливо в промислових зонах. Папороті, що зустрічаються на територіях з високими концентраціями забруднювачів, можуть мати відхилення у своєму розвитку та зростанні через накопичення важких металів і токсичних речовин, що потрапляють в атмосферу або ґрунт. Це дозволяє використовувати ці рослини для моніторингу забруднення в зонах, де людська діяльність має великий вплив на навколишнє середовище.

Також, деякі сільськогосподарські культури, як-от пшениця та кукурудза, є важливими індикаторами стану навколишнього середовища і можуть відображати рівень забруднення повітря через зниження своєї врожайності. У разі підвищення концентрації забруднювачів у повітрі, таких як оксиди азоту, важкі метали або інші токсичні сполуки, ці культури часто демонструють зниження росту, жовтизну листя або зменшення кількості та якості зерна. Це явище пов'язане з тим, що забруднювачі погіршують процеси фотосинтезу та інші життєво важливі функції рослин. Спостереження за станом таких культур може бути використано як додатковий метод для оцінки рівня забруднення

атмосферного повітря, особливо в аграрних районах або поблизу великих промислових об'єктів.

Всі ці рослини – лишайники, мохи, папороті та сільськогосподарські культури є важливими природними індикаторами стану навколишнього середовища. Вони здатні не лише виявляти наявність забруднювачів у повітрі, але й демонструвати їхню концентрацію та потенційний вплив на екосистеми. Тому вивчення їхнього стану та динаміки росту може бути ефективним інструментом для моніторингу якості повітря та планування заходів з охорони навколишнього середовища [18].

Зелена інфраструктура, включаючи парки, сквери та зелені дахи, відіграє важливу роль у боротьбі із забрудненням повітря. Рослини здатні поглинати газоподібні та твердоподібні забруднювачі, знижуючи їх концентрацію у повітрі. Дослідження показують, що зелені насадження в міських районах можуть знижувати рівень дрібнодисперсних частинок PM_{2.5} від 10 % до 20 %. Крім того, рослинність сприяє зниженню температури у містах, що допомагає запобігати утворенню фотохімічного смогу.

Таким чином, забруднене повітря негативно впливає на рослинний світ, викликаючи численні пошкодження на клітинному рівні, уповільнення росту та зменшення врожайності. Водночас зелена інфраструктура є важливим засобом боротьби із забрудненням, сприяючи очищенню повітря та збереженню екосистем у містах [19].

Зміна клімату в урбоекосистемах також значно впливає на якість атмосферного повітря, посилюючи існуючі проблеми забруднення. Зокрема, підвищення середньорічної температури сприяє утворенню фотохімічного смогу. Цей процес зумовлений активнішими хімічними реакціями між оксидами азоту (NO_x) та ЛОС під впливом сонячного випромінювання. У результаті збільшується концентрація озону на приземному рівні, що є серйозною загрозою для здоров'я людини, особливо для респіраторної системи.

Фотохімічний смог – це складне атмосферне явище, яке виникає в результаті взаємодії шкідливих викидів промисловості та транспорту з сонячним випромінюванням. Це не просто суміш диму та туману, а продукт складних фотохімічних реакцій, що відбуваються в атмосфері. Негативно впливає на респіраторну систему, спричиняючи алергічні реакції, подразнення дихальних шляхів і підвищення ризику розвитку астми та хронічних обструктивних захворювань легень. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я, понад 90 % населення міст дихає повітрям із рівнем забруднення, що перевищує допустимі норми.

Дослідження показують, що зміни клімату також впливають на частоту та інтенсивність опадів, які є одним із природних механізмів очищення повітря.

Зменшення кількості дощів у регіоні призводить до більш тривалого перебування забруднювачів в атмосфері, збільшуючи їх концентрацію. Такі умови особливо небезпечні для міських агломерацій, зокрема для міста Хмельницький, де значна частка забруднення формується внаслідок інтенсивного руху транспорту та стаціонарних джерел.

Порушення режиму вітру через зміни клімату також впливає на розсіювання забруднювачів. Наприклад, у містах із високою щільністю забудови створюються застійні зони, де концентрація шкідливих речовин залишається підвищеною протягом тривалого часу.

Крім того, парникові гази, такі як вуглекислий газ (CO_2) та метан (CH_4), що виділяються від промислових підприємств, транспорту й побутового сектору, сприяють посиленню глобального потепління. Їх висока концентрація також є характерною для урбокосистем, через що локальні джерела забруднення мають значний вплив на клімат регіону.

Зворотний вплив забруднення повітря на клімат також є важливим фактором. Дрібнодисперсні частинки ($\text{PM}_{2.5}$), які містяться у викидах від транспорту та промисловості, здатні змінювати утворення хмар, що впливає на

відбивну здатність атмосфери. Наприклад, чорний вуглець (сажа), осідаючи на поверхні льодовиків, знижує їхню відбивну здатність та прискорює танення.

Підвищення температури та тривалі посушливі періоди, характерні для зміни клімату, сприяють збільшенню частоти лісових пожеж. Викиди під час таких пожеж включають сажу, чадний газ (CO) і леткі органічні сполуки, які значно погіршують якість повітря навіть у віддалених від пожеж регіонах. Лісові пожежі також сприяють додатковим викидам парникових газів, підсилюючи глобальне потепління.

Таким чином, забруднення повітря в урбоекосистемах не лише впливає на локальну екологічну ситуацію, але й має тісний взаємозв'язок зі змінами клімату. Ці аспекти повинні враховуватися при розробці комплексних заходів щодо покращення якості атмосферного повітря [20, 21].

2 АНАЛІЗ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ: НАЦІОНАЛЬНИЙ ТА МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД

2.1 Системи державного та громадського моніторингу атмосферного повітря в Україні

Моніторинг атмосферного повітря є одним із ключових інструментів сучасної екологічної науки та практики, що забезпечує систематичне спостереження за якістю атмосферного середовища, аналіз отриманих даних, їхню інтерпретацію, а також прогнозування можливих змін. Ця діяльність має на меті зменшення негативного впливу забруднення на здоров'я населення, збереження екосистем, а також сприяння досягненню екологічної рівноваги.

У глобальному масштабі стан атмосферного повітря є одним із найважливіших показників екологічного благополуччя.

Сучасна урбанізація, індустріалізація, інтенсивне використання транспортних засобів та енергетичних ресурсів значно впливають на атмосферу, підвищуючи рівень забруднюючих речовин. У відповідь на ці виклики міжнародне співтовариство та уряди окремих країн активно розвивають системи моніторингу якості повітря. Ці системи дозволяють не тільки виявляти джерела забруднення, а й розробляти та впроваджувати ефективні стратегії його зменшення [22].

Моніторинг атмосферного повітря передбачає багатофункціональну діяльність, яка охоплює широкий спектр завдань. Відповідно до нормативно-правових актів України, таких як Закон України «Про охорону атмосферного повітря» та Постанова Кабінету Міністрів України № 827 від 14 серпня 2019 р. «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря», основними цілями моніторингу є забезпечення населення, органів влади та наукових установ достовірною інформацією про стан

повітряного середовища, розробка превентивних заходів щодо запобігання погіршенню якості повітря, а також підвищення рівня екологічної свідомості громадськості.

Основною метою моніторингу атмосферного повітря є створення інформаційної бази для прийняття ефективних управлінських рішень, спрямованих на поліпшення екологічної ситуації та забезпечення здоров'я населення. У контексті сучасних екологічних викликів ця мета має стратегічний характер, адже якість повітря безпосередньо впливає не лише на самопочуття людей, а й на продуктивність сільського господарства, стан водних і ґрунтових ресурсів, а також на кліматичні зміни [23].

Екологічний моніторинг – це інформаційна система спостережень, оцінки і прогнозування змін стану навколишнього природного середовища, створена з метою виділення антропогенної складової цих змін на фоні природних процесів.

ДСМ України являє собою комплексну систему спостережень, збирання, обробки, передавання, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін і розроблення науково-обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативним змінам стану довкілля та дотримання вимог екологічної безпеки [24].

ДСМ України ґрунтується на принципах:

- науковості та об'єктивності – дані моніторингу мають бути отримані за допомогою методів, що відповідають сучасним науковим знанням, та неупереджено відображати стан довкілля;
- системності та комплексності – моніторинг охоплює всі компоненти довкілля (атмосферу, ґрунти, води, біосферу) та фактори, що впливають на них;
- диференційованості – моніторинг проводиться з урахуванням природних та антропогенних факторів, а також особливостей екологічного стану різних регіонів України;

- динамічності – моніторинг здійснюється постійно, з періодичністю, що відповідає динаміці змін стану довкілля;
- інформаційної відкритості – дані моніторингу доступні для громадськості та органів державної влади [25].

Структура державного моніторингу атмосферного повітря України включає такі рівні як: глобальний, центральний, регіональний та імпактний, Схематичне зображення рівнів моніторингу атмосферного повітря зображено на рисунку 2.1.

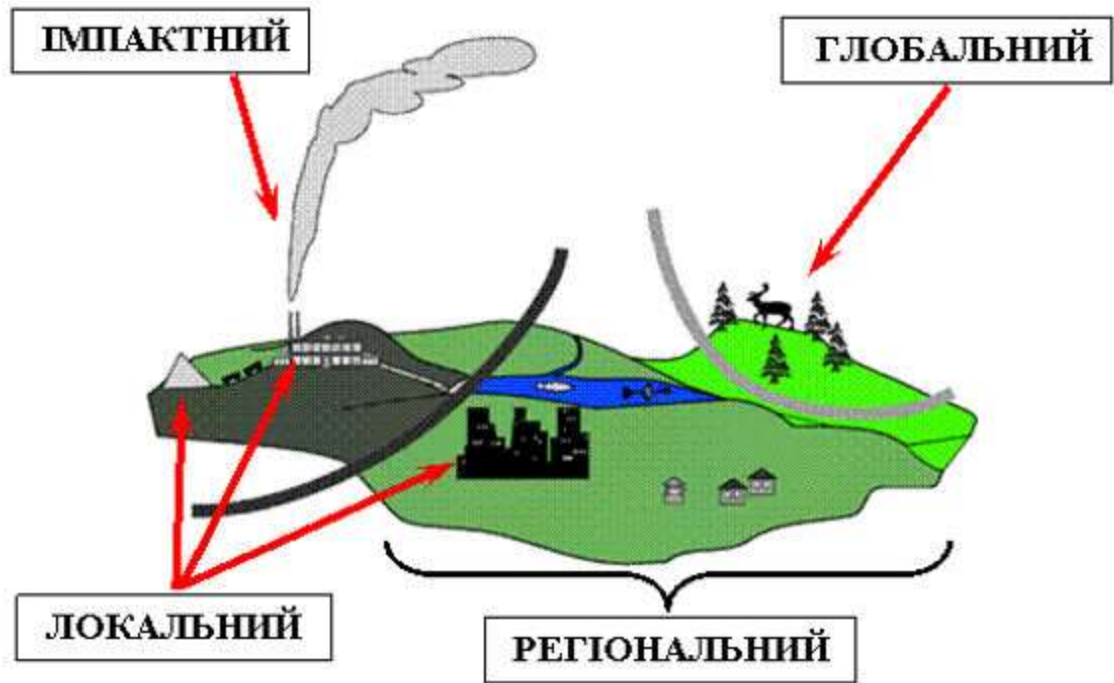


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення рівнів моніторингу атмосферного повітря [26]

Глобальний рівень моніторингу спрямований на оцінку впливу забруднення повітря на клімат Землі та біосферу в цілому. Він включає в себе міжнародне співробітництво, обмін даними, розробку глобальних моделей розповсюдження забруднювачів.

Центральний рівень моніторингу передбачає створення національних мереж спостереження за якістю повітря, розробку єдиних методологій та стандартів, а також координацію діяльності різних органів влади, відповідальних за моніторинг. Мета такого рівня – отримання загальної картини стану повітря на території країни та розробка загальнонаціональних програм покращення якості повітря. До центрального рівня належать:

- Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України (Міндовкілля) – головний орган державного управління у сфері екологічного моніторингу;

- Державна служба з надзвичайних ситуацій (ДСНС) – відповідає за моніторинг надзвичайних ситуацій екологічного характеру;

- Міністерство охорони здоров'я (МОЗ) – здійснює моніторинг впливу довкілля на здоров'я людей;

- Міністерство аграрної політики та продовольства України (Мінагрополітики) – проводить моніторинг стану ґрунтів та водних ресурсів у сільській місцевості;

- Державний комітет лісового та мисливського господарства України (Держкомлісгосп) – відповідає за моніторинг стану лісів;

- Державна служба геодезії, картографії та кадастру (Держгеокадастр) – здійснює моніторинг земельних ресурсів;

- Державна агенція водних ресурсів України (Держводагентство) – відповідає за моніторинг водних ресурсів;

Державний науково-дослідний інститут екології та природокористування (ДНДІЕП) – науково-методичний центр ДСМ України.

Регіональний рівень моніторингу дозволяє оцінити стан атмосферного повітря на великій території, виявити регіональні тенденції зміни забруднення та розробити відповідні заходи для покращення екологічної ситуації.

До регіонального рівня моніторингу належать:

– Департаменти екології та природних ресурсів обласних державних адміністрацій – відповідають за організацію та проведення моніторингу на території своїх областей;

– регіональні центри з надання інформації про стан довкілля (РЦЗІД) – збирають, обробляють та аналізують дані моніторингу в регіонах.

Локальний рівень моніторингу передбачає спостереження за якістю повітря на конкретній території, наприклад, у межах міста або промислової зони. Мета такого моніторингу – оцінка впливу локальних джерел забруднення на здоров'я населення та розробка заходів для покращення якості повітря в конкретній місцевості.

До локального рівня моніторингу належать:

– лабораторії та станції моніторингу довкілля – проводять безпосередні спостереження за станом довкілля;

– підприємства, установи та організації, які здійснюють діяльність, що може негативно впливати на довкілля, – проводять моніторинг довкілля у сфері своєї діяльності [25].

Державний моніторинг атмосферного повітря в Україні регламентується низкою нормативно-правових актів, які визначають вимоги до збору, обробки та аналізу даних про якість повітря. Основою для цього є Закон України «Про охорону атмосферного повітря», що регламентує основні принципи охорони повітря від забруднення. Він встановлює вимоги до створення систем моніторингу, зобов'язує підприємства зменшувати вплив шкідливих викидів і вимагає регулярного інформування суспільства про стан повітря [22].

Постанова Кабінету Міністрів України № 827 від 14 серпня 2019 року визначає порядок проведення моніторингу. Цей документ деталізує механізми організації моніторингу, критерії оцінки якості повітря та перелік зон і агломерацій, де моніторинг є обов'язковим [23].

Також важливими є інші постанови уряду, які стосуються регулювання викидів стаціонарними джерелами забруднення. Наприклад, Постанова КМУ № 301 від 2002 року стосується видачі дозволів на такі викиди, а Постанова КМУ № 299 визначає екологічні нормативи безпеки повітря [27, 28].

Крім того, Україна активно гармонізує своє законодавство з європейськими директивами, зокрема Директивою 2008/50/ЄС «Про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи». Це передбачає впровадження новітніх технологій моніторингу, удосконалення методологій вимірювання забруднень та посилення контролю за джерелами викидів.

В Україні використовуються кілька методів моніторингу якості атмосферного повітря, кожен із яких має свої особливості й мету.

Фіксовані вимірювання проводяться на постійних пунктах моніторингу. Ці станції забезпечують дані для оцінки середньорічних і добових рівнів забруднення. Вимірюються такі речовини, як діоксид сірки, оксиди азоту, озон, тверді частки PM_{2.5} і PM₁₀, бенз(а)пірен та інші.

Індикативні вимірювання є менш точними, але дозволяють швидко оцінювати стан повітря в регіонах, де немає постійних станцій моніторингу.

Мобільні лабораторії використовуються для оперативного аналізу якості повітря в проблемних точках, наприклад, поблизу великих промислових зон або під час надзвичайних ситуацій.

Системи автоматичного моніторингу забезпечують безперервний збір даних про концентрацію шкідливих речовин. Такі системи вже встановлені у великих містах, зокрема в Києві, Дніпрі, Харкові та Львові. Їхня перевага полягає в можливості отримання оперативної інформації, яка може бути використана для попередження населення про небезпечні рівні забруднення [29].

Система екологічного моніторингу в Україні потребує суттєвого вдосконалення. Це зумовлено кількома факторами, серед яких застарілість нормативно-правової бази, недостатня інтеграція з міжнародними стандартами

та технічне забезпечення. Багато нормативних актів були прийняті кілька десятиліть тому і не відповідають сучасним вимогам. Існуюча система моніторингу часто не відповідає стандартам ЄС та інших міжнародних організацій. Крім того, багато станцій моніторингу обладнані застарілим обладнанням, що не дозволяє отримувати точні та своєчасні дані.

Система моніторингу атмосферного повітря в Україні зазнала суттєвих позитивних змін останніми роками.

В Україні було прийнято кілька важливих нормативних актів, спрямованих на вдосконалення системи екологічного моніторингу. Серед них варто виділити Закон України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», який визначає основні напрямки державної політики в сфері екології, включаючи моніторинг довкілля [30].

Іншим важливим документом є Закон України «Про оцінку впливу на довкілля», що встановлює процедури оцінки впливу на довкілля для проектів, які можуть мати значний вплив на екологічну ситуацію. До того ж були прийняті нові державні стандарти та методики для вимірювання та оцінки різних параметрів довкілля, що відповідають європейським та міжнародним вимогам [31].

Новим потужним інструментом моніторингу, що відповідає сучасним трендам діджиталізації, є розробка ЕкоСистеми рисунок 2.2.

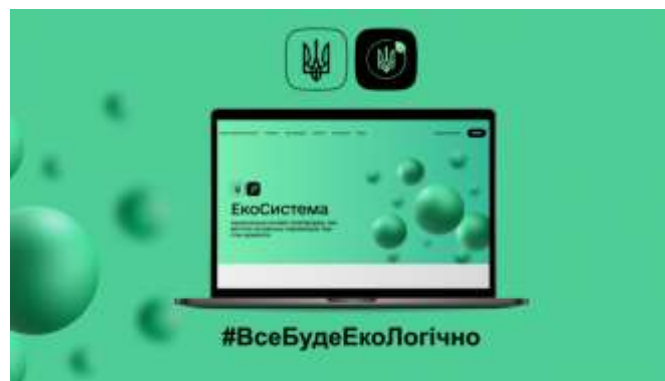


Рисунок 2.2 – Портал ЕкоСистема

ЕкоСистема є інноваційною державною розробкою, спрямованою на моніторинг стану навколишнього середовища в Україні. Цей цифровий інструмент був створений Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України з метою забезпечення ефективного контролю за екологічною ситуацією в країні. Основна мета системи полягає у зборі, аналізі та візуалізації даних про стан довкілля, що дозволяє своєчасно виявляти екологічні проблеми та вживати необхідних заходів для їх вирішення.

ЕкоСистема надає широкий спектр можливостей для користувачів, серед яких:

- збір даних, автоматизований процес збору екологічних даних з різних джерел, включаючи датчики моніторингу повітря, води та ґрунту;
- аналіз даних, використання алгоритмів обробки великих даних для виявлення тенденцій та аномалій у екологічних показниках;
- візуалізація даних, інтерактивні карти, графіки та звіти, які надають користувачам зрозумілу інформацію про екологічний стан у реальному часі;
- прогнозування, моделювання можливих сценаріїв розвитку екологічної ситуації на основі наявних даних.

ЕкоСистема отримує дані з різних джерел, серед яких:

- стаціонарні екологічні пости – мережа стаціонарних постів, розташованих по всій території України, які регулярно передають дані про рівень забруднення повітря, води та ґрунту;
- мобільні лабораторії – спеціально обладнані автомобілі, які здійснюють моніторинг екологічного стану в різних регіонах країни, особливо в зонах підвищеного ризику;
- супутникові дані – використання супутників для отримання інформації про екологічний стан на великих територіях, зокрема лісів, водойм та сільськогосподарських угідь;

– громадські ініціативи – залучення громадськості до процесу моніторингу шляхом створення мережі волонтерів, які надають дані про екологічну ситуацію у своїх регіонах [32].

ЕкоСистема відіграє критично важливу роль у забезпеченні екологічної безпеки та сталого розвитку України. Вона має значний вплив на різні аспекти життя суспільства та державного управління. ЕкоСистема забезпечує доступ до актуальної та надійної інформації про стан навколишнього середовища для громадськості. Це сприяє підвищенню екологічної обізнаності серед населення, що в свою чергу стимулює громадян до відповідальнішого ставлення до природи.

Наприклад, через платформу зацікавлені особи та громадськість можуть дізнаватися про рівень забруднення повітря в їхньому місті і приймати відповідні заходи для захисту свого здоров'я. Для органів державної влади ЕкоСистема є незамінним інструментом для прийняття обґрунтованих рішень у сфері екологічної політики. Завдяки детальним та актуальним даним про екологічну ситуацію, уряд може розробляти та впроваджувати ефективні стратегії та програми з охорони навколишнього середовища [33].

Також в Україні виникло чимало громадських ініціатив, що сприяють підвищенню екологічної свідомості та забезпечують доступ до актуальних екологічних даних.

Проект «ЕкоСіті» був започаткований у 2018 році командою активістів з Івано-Франківська. Його основною метою стало створення доступної системи моніторингу якості повітря за допомогою недорогих датчиків та відкритого програмного забезпечення.

Система базується на сенсорах, що вимірюють вміст дрібнодисперсного пилу (PM2.5 і PM10), температуру та вологість повітря. Використання відкритих платформ, таких як Arduino та Raspberry Pi, дозволяє знижувати вартість обладнання, що робить систему доступною для громадських організацій і

приватних осіб. Дані передаються на сервер у режимі реального часу, обробляються та виводяться на інтерактивній карті.

Станом на 2024 рік, мережа «ЕкоСіті» охоплює понад 200 станцій моніторингу по всій Україні. Платформа стала важливим інструментом не лише для громадян, але й для місцевих органів влади, які використовують її для екологічного планування.

Проект сприяв підвищенню обізнаності населення щодо проблеми забруднення повітря. Багато мешканців міст стали активно використовувати ці дані для інформування про екологічні ризики та для тиску на місцеві органи влади з метою зменшення шкідливих викидів в атмосферне повітря [34].

«SaveEcoBot» є прикладом сучасного цифрового інструменту, який сприяє розвитку екологічної свідомості та прозорості у сфері управління природними ресурсами. Його було створено в рамках громадської ініціативи для автоматизації процесів екологічного моніторингу та забезпечення доступу до екологічних даних у зручному та зрозумілому форматі. Цей інструмент об'єднує інформацію з різних державних екологічних реєстрів і працює на основі відкритих даних, що забезпечує високу точність і надійність наданої інформації, рисунок 2.3.



Рисунок 2.3 – Офіційний знак SaveEcoBot

Основні функції SaveEcoBot включають:

- місця збору вторинної сировини – користувачі можуть легко знайти пункти прийому паперу, пластику, скла, металу та інших відходів, які можна переробити, сприяючи зменшенню забруднення довкілля;
- реєстри забруднювачів – система надає доступ до даних про підприємства та установи, які здійснюють викиди забруднюючих речовин у довкілля;
- дозволи на викиди та поводження з небезпечними відходами – інформація про чинні дозволи та умови їх отримання, що допомагає підприємствам дотримуватись екологічних норм;
- екологічні події та попередження – оперативне інформування про аварійні ситуації, зміни у стані навколишнього середовища та інші важливі події.

За кілька років роботи ботом скористалися понад 500 тисяч користувачів. Його інтеграція з відкритими даними забезпечила прозорість у сфері управління відходами та сприяла зниженню корупційних ризиків у видачі екологічних дозволів.

SaveEcoBot полегшує процес дотримання екологічного законодавства для підприємств, забезпечуючи їх актуальною інформацією про вимоги регуляторних органів. Водночас громадяни отримують зручний доступ до інформації про екологічну ситуацію у своєму регіоні.

Завдяки SaveEcoBot Україна зробила значний крок до впровадження цифрових рішень у сфері екології, які не лише полегшують доступ до інформації, але й сприяють створенню екологічно відповідального суспільства.

Дослідження проєктів «ЕкоСіті», «SaveEcoBot» і платформи «Екосистема» демонструє, що сучасні цифрові технології можуть значно підвищити ефективність екологічного моніторингу та управління. Завдяки інтеграції відкритих даних, використанню інноваційного обладнання та залученню

громадськості ці ініціативи сприяють вирішенню екологічних проблем у національному та локальному масштабах. Застосування таких платформ дозволяє не лише підвищити прозорість і точність екологічних даних, але й залучити широку аудиторію до їх використання, що є ключовим фактором успішної реалізації екологічної політики. Подальший розвиток цих проектів та їх інтеграція у міжнародні екологічні ініціативи сприятимуть сталому розвитку України [35].

Моніторинг атмосферного повітря є основою екологічної політики багатьох країн світу. У міжнародній практиці він спрямований не лише на зменшення рівнів забруднення, а й на збереження здоров'я населення та стабільність екосистем. Інтеграція сучасних технологій, гармонізація стандартів і співпраця між державами створюють ефективну основу для боротьби із забрудненням атмосфери.

Основним керівництвом у цій сфері є рекомендації ВООЗ. Цією організацією запроваджено Глобальні рекомендації щодо якості повітря (AQG), що встановлюють граничні значення концентрацій для основних забруднюючих речовин, таких як дрібнодисперсні частки PM_{2.5} і PM₁₀, діоксид азоту, озон, чадний газ і сірчистий ангідрид. Наприклад, граничне середньорічне значення для PM_{2.5} не повинно перевищувати 5 мкг/м³ [36].

Ці показники засновані на багаторічних дослідженнях, які доводять зв'язок між високими концентраціями цих речовин і такими захворюваннями, як серцево-судинні порушення, респіраторні хвороби, онкологічні захворювання. Використання цих рекомендацій як нормативної бази сприяло зменшенню рівнів забруднення в багатьох країнах.

2.2 Досвід функціонування системи моніторингу атмосферного повітря в країнах ЄС, Азії та США

Європейський Союз є одним із лідерів у впровадженні системного підходу до моніторингу повітря. Директива 2008/50/ЄС «Про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи» встановила комплексний підхід до оцінки якості повітря. Документ регламентує вимоги до моніторингу, методів вимірювання, а також до формування політик, спрямованих на скорочення забруднення. Основою європейської системи моніторингу є Європейська мережа моніторингу якості повітря (Air Quality Monitoring Network), що охоплює понад 4 000 станцій у країнах-членах ЄС. Значну роль відіграє програма Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), яка використовує супутникові дані для прогнозування забруднення, аналізу джерел і створення карт поширення забруднювачів. Завдяки цим зусиллям у країнах ЄС із 2000 до 2020 року рівень PM_{2.5} зменшився в середньому на 18 %, що позитивно вплинуло на здоров'я громадян і якість життя [37].

У США Агентство з охорони навколишнього середовища (EPA) реалізує національну програму моніторингу в рамках закону Clean Air Act, ухваленого у 1970 році. Програма National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) визначає стандарти для шести основних забруднювачів: дрібнодисперсних часток, озону, чадного газу, свинцю, діоксиду сірки та оксидів азоту. Для збору даних функціонує система Air Quality System (AQS), що включає понад 4 000 станцій. Оперативна обробка даних дозволяє створювати прогнози якості повітря в режимі реального часу, що робить інформацію доступною через мобільні додатки, такі як AirNow. За останні два десятиліття завдяки впровадженню інноваційних технологій рівень діоксиду сірки в атмосфері США знизився на 80 %, а оксид азоту – на 60 %. Це суттєво скоротило частоту кислотних дощів і зменшило кількість захворювань, спричинених забрудненням [38].

Китай стикається з найбільш серйозними викликами у сфері забруднення повітря, що обумовлено швидкою урбанізацією, інтенсивним промисловим розвитком і високою щільністю населення. Для боротьби із цією проблемою Китай запровадив масштабну систему моніторингу якості повітря, яка охоплює понад 1 500 станцій у 337 містах.

Основна увага приділяється вимірюванню рівнів PM_{2.5}, які є основним фактором утворення смогу. На додаток до наземних станцій активно використовуються супутникові технології, зокрема китайська супутникова програма Gaofen. Використання технологій обробки великих даних і штучного інтелекту дозволяє виявляти джерела забруднення та моделювати можливі сценарії їхнього поширення. Завдяки цим заходам у період з 2013 до 2019 року концентрація PM_{2.5} у великих містах Китаю знизилася на 33 %, що дозволило зменшити кількість передчасних смертей на 150 000 випадків [39].

Схожі проблеми спостерігаються в Індії, де програма National Clean Air Programme спрямована на зменшення концентрації PM_{2.5} і PM₁₀ від 20 до 30 % до 2024 року. Для цього в країні встановлено понад 1 000 станцій у 132 містах, а також запроваджено мобільні лабораторії для оцінки забруднення у важкодоступних районах. Інтеграція супутникових даних і мобільних технологій забезпечує ефективне реагування на екологічні виклики [40].

Японія, з її високою урбанізацією, демонструє успішний приклад інтеграції громадськості в процес моніторингу. Програма Basic Environment Plan передбачає щорічну публікацію звітів про стан повітря, що підвищує екологічну обізнаність громадян.

Жорсткі екологічні стандарти для промислових підприємств і транспортних засобів дозволили знизити рівень PM_{2.5} до середнього значення 10 мкг/м³, що є одним із найнижчих показників у світі. Високотехнологічний підхід також застосовується в Південній Кореї. У Сеулі інтегрована система моніторингу повітря поєднує дані наземних станцій, супутникового моніторингу

та мобільних додатків. У 2022 році у місті впроваджено повітряні фільтри в громадських місцях, таких як метро, що значно покращило якість повітря в приміщеннях і на відкритому просторі [41].

ШІ та великі дані відіграють ключову роль у розвитку сучасних систем моніторингу атмосферного повітря, забезпечуючи високу точність прогнозів і аналізу. Використання цих технологій дозволяє створювати моделі, які враховують численні фактори, включаючи кліматичні умови, рівень урбанізації, типи джерел забруднення та інші екологічні аспекти. Такий підхід є надзвичайно ефективним у країнах з високою щільністю населення, де складність екологічних процесів потребує нових інструментів для моніторингу та управління.

Одним із провідних прикладів є програма Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), яка використовує штучний інтелект для обробки супутникових даних. CAMS розробляє моделі розповсюдження забруднювачів у реальному часі, враховуючи погодні умови, сезонні коливання та локальні джерела забруднення. Дані, зібрані через цю програму, інтегруються у великі масиви даних і аналізуються за допомогою ШІ для створення прогнозів якості повітря на декілька днів наперед. Прогнози використовуються не лише державними установами, а й приватними компаніями для прийняття рішень у сферах транспорту, енергетики та міського планування. Наприклад, завдяки CAMS у країнах ЄС удалося на 25% зменшити рівень забруднення транспортним сектором шляхом оптимізації маршрутів і впровадження зон з низькими викидами [42].

У Китаї, який активно впроваджує інноваційні технології для боротьби із забрудненням, використання великих даних і ШІ стало основою програми моніторингу Blue Sky Initiative. За допомогою алгоритмів машинного навчання уряд аналізує мільярди записів про якість повітря, отриманих із наземних станцій, супутників і мобільних сенсорів. Дані використовуються для прогнозування піків забруднення і моделювання сценаріїв зменшення викидів у

промислових зонах. Наприклад, у 2019 році ці технології дозволили знизити рівень PM2.5 у Пекіні на 21 %, впровадивши обмеження для найбільш забруднюючих підприємств у періоди високого ризику [39].

Штучний інтелект також використовується для аналізу впливу забруднення на здоров'я населення. Наприклад, у ЄС та США працюють проекти, які об'єднують дані медичних установ із даними моніторингу атмосферного повітря. Такий підхід дозволяє виявляти зв'язок між рівнем забруднення та поширенням захворювань, таких як астма чи серцево-судинні порушення. На основі цих досліджень уряди розробляють політики для покращення якості повітря, спрямовані на зменшення соціально-економічних втрат через хвороби, спричинені забрудненням [43].

Громадські ініціативи відіграють важливу роль у моніторингу якості повітря, особливо у контексті підвищення екологічної обізнаності населення та впливу на політику. У багатьох країнах ЄС і США громадські організації, активісти та волонтери розробляють проекти, які дозволяють залучити широкую аудиторію до вирішення проблеми забруднення повітря.

В Європі одним із найуспішніших проектів є ініціатива AirVisual, що функціонує у Франції. Ця платформа дозволяє громадянам використовувати портативні датчики для моніторингу якості повітря у своїх домівках або районах. Дані з цих пристроїв автоматично передаються до центральної системи, яка обробляє їх і створює інтерактивні карти якості повітря в реальному часі. В результаті громадськість отримує доступ до актуальної інформації, що допомагає приймати рішення щодо пересування, вибору місць для відпочинку чи навчальних закладів. Наприклад, у Парижі цей проект сприяв впровадженню зон з обмеженим доступом автомобільного транспорту, що дозволило знизити рівень PM2.5 на 18 % у центральних районах міста [44].

У Німеччині особливо успішним став проект Citizen Science Initiative, який залучає волонтерів до моніторингу атмосферного повітря за допомогою

недорогих сенсорів. Учасники проекту отримують комплекти для самостійного встановлення датчиків, а їхні дані надсилаються до загальнонаціональної платформи. У Берліні ця ініціатива виявила значне перевищення рівня NO₂ поблизу великих автомагістралей, що стало основою для судових позовів проти уряду через невиконання норм ЄС щодо якості повітря. Як результат, у столиці були введені додаткові обмеження на використання дизельних автомобілів, що покращило якість повітря в міських районах [45].

У США громадська організація Environmental Defense Fund (EDF) у співпраці зі стартапами створила платформу Air Quality Mapping Initiative, яка інтегрує дані від громадян із професійними даними про якість повітря. Одним із найбільш відомих проектів стало моніторингове дослідження в Окленді, Каліфорнія. Учасники встановили мобільні сенсори на транспортні засоби, які дозволили створити детальні карти забруднення у різних частинах міста. Ці дані допомогли міській раді ввести нові екологічні стандарти для промислових зон і посилити контроль за викидами. Як наслідок, рівень забруднення NO₂ у найбільш уразливих районах знизився на 15 % за два роки [46].

Крім того, у США працює платформа PurpleAir, що створила глобальну мережу моніторингу якості повітря на основі даних від громадян. Використовуючи недорогі датчики, ця ініціатива дозволяє будь-кому долучитися до спостережень за станом повітря у своєму регіоні. Дані публікуються у відкритому доступі, що стимулює дискусії про екологічну ситуацію та сприяє залученню нових учасників до моніторингу. У 2021 році ця мережа стала однією з ключових платформ для оцінки впливу лісових пожеж на якість повітря у Західних штатах США, включаючи Каліфорнію та Орегон.

Ці приклади демонструють, як активна участь громадськості сприяє вдосконаленню систем моніторингу атмосферного повітря. Завдяки громадським ініціативам, екологічна обізнаність зростає, а політики отримують важливі аргументи для запровадження більш жорстких стандартів [47].

Ще одним цікавим інструментом країн ЄС став СВМ (Carbon Border Adjustment Mechanism), впроваджений Європейським Союзом, є одним із ключових інструментів боротьби зі зміною клімату та глобальним забрудненням. Цей механізм встановлює карбоновий податок на імпорт продукції, виробленої із значними викидами парникових газів. Основною метою СВМ є уникнення так званого «витоку вуглецю», коли виробники переносять своє виробництво до країн із менш суворими екологічними нормами. Однак, цей механізм також сприяє зниженню рівнів забруднювачів, таких як SO₂, NO_x та PM_{2.5}, у країнах-експортерах.

СВМ стимулює інвестиції в сучасні технології, які дозволяють не лише знизити викиди CO₂, але й покращити якість повітря. Наприклад, технології уловлювання та зберігання вуглецю (CCUS) стають невід'ємною частиною модернізації промисловості в країнах, які експортують продукцію до ЄС. Ці системи дозволяють зберігати до 90 % викидів CO₂, що також знижує супутні забруднювачі. У Туреччині та Індії, зокрема, впровадження цих технологій призвело до скорочення рівнів PM_{2.5} у промислових регіонах від 15 % до 20 % за останні роки.

СВМ також сприяє впровадженню відновлюваних джерел енергії. У країнах-експортерах, таких як Марокко та Єгипет, реалізуються великі проекти з переходу до сонячної та вітрової енергетики. У результаті не лише скорочуються викиди парникових газів, але й суттєво покращується якість повітря, особливо у промислових районах із високою концентрацією підприємств.

Крім того, СВМ стимулює використання цифрових платформ для моніторингу викидів. Технології блокчейну, наприклад, забезпечують прозорість даних про викиди на кожному етапі виробництва. Це дозволяє точно відстежувати джерела забруднення та ухвалювати ефективні екологічні рішення. У ЄС такі платформи вже стали частиною екологічної політики, а їх

використання країнами-експортерами стає обов'язковим для доступу на європейські ринки.

СВАМ не лише сприяє досягненню кліматичних цілей ЄС, але й стає каталізатором позитивних змін у країнах, що розвиваються. Згідно з прогнозами Європейської комісії, до 2030 року механізм дозволить знизити загальні викиди парникових газів у секторах, які підпадають під його дію, на 10 %. Супутнє зниження локального забруднення сприятиме покращенню якості повітря у промислових регіонах, де раніше спостерігалися високі рівні забруднення [48].

Глобальна кліматична спостережна система (Global Climate Observing System, GCOS) є міжнародною ініціативою, започаткованою у 1992 році Всесвітньою метеорологічною організацією (WMO), Міжурядовою океанографічною комісією (ІОС), Програмою ООН з навколишнього середовища (UNEP) та Міжнародною радою наукових союзів (ICSU). GCOS забезпечує систему моніторингу клімату, яка охоплює основні компоненти глобальної екосистеми: атмосферу, океани та сушу.

Основною метою програми є створення глобальної мережі для збору, обробки та аналізу даних, які дозволяють оцінити стан клімату та його зміни. Важливу роль у GCOS відіграє моніторинг атмосферного повітря, оскільки він надає інформацію про концентрації ключових забруднювачів та парникових газів, таких як вуглекислий газ, метан, оксид азоту та озон. Дані, зібрані GCOS, сприяють визначенню довгострокових трендів кліматичних змін, які можуть бути спричинені антропогенними факторами.

Особливістю GCOS є його інтеграція з національними та регіональними програмами моніторингу, такими як Європейська програма Copernicus або американська система моніторингу EPA. Дані GCOS використовуються для підготовки звітів Міжурядової групи експертів зі змін клімату (IPCC), а також для підтримки реалізації міжнародних угод, таких як Паризька кліматична угода.

GCOS підтримує розробку стандартів для моніторингу якості даних, що забезпечує їхню сумісність між різними країнами. Система охоплює наземні, повітряні та супутникові спостереження, дозволяючи отримувати дані як про локальні джерела забруднення, так і про їх глобальний вплив. Крім того, GCOS активно сприяє впровадженню інноваційних технологій, таких як супутниковий моніторинг, для отримання детальних карт розповсюдження забруднювачів.

GCOS є важливим інструментом для визначення зв'язку між якістю атмосферного повітря та кліматичними змінами. Його інтеграція з міжнародними програмами забезпечує глобальний підхід до оцінки впливу забруднення на клімат та біосферу [49].

Арктична програма моніторингу та оцінки (Arctic Monitoring and Assessment Programme, АМАР) є однією з основних програм, що досліджує вплив антропогенного забруднення на арктичний регіон. Ця програма була започаткована у 1991 році в рамках Арктичної ради з метою моніторингу, оцінки та звітування про зміни стану навколишнього середовища в Арктиці.

Основна увага АМАР приділяється вивченню транспортування забруднюючих речовин, таких як ртуть, важкі метали, стійкі органічні забруднювачі (POP), а також дрібнодисперсних часток (PM_{2.5} і PM₁₀), які впливають на якість повітря та екосистеми регіону. Оскільки Арктика є глобальною кліматичною лабораторією, вивчення її екосистем допомагає зрозуміти загальні тенденції змін у атмосфері.

Особливістю програми АМАР є її мультидисциплінарний підхід: вона інтегрує дані з наземних, морських і повітряних спостережень для виявлення джерел забруднення, їхніх шляхів міграції та наслідків. Наприклад, АМАР досліджує, як трансграничне перенесення забруднювачів із промислово розвинених регіонів (Європи, Азії та Північної Америки) впливає на екосистеми Арктики.

Дані АМАР використовуються для розробки міжнародних політик і угод, таких як Конвенція про транскордонне забруднення повітря на великі відстані (CLRTAP) і Стокгольмська конвенція про POP. Вони також є важливими для створення моделей кліматичних змін, оскільки Арктика нагрівається майже вдвічі швидше за інші регіони світу.

Окрім наукових досліджень, програма АМАР спрямована на інформування урядів і громадськості про екологічний стан Арктики, акцентуючи увагу на впливі забруднення на здоров'я корінних народів, які проживають у цьому регіоні. Це робить АМАР важливим елементом міжнародного моніторингу атмосферного повітря та глобальної екологічної політики [50].

Системи моніторингу атмосферного повітря в Україні та за кордоном мають багато спільних рис. Насамперед вони орієнтовані на досягнення однієї мети – контроль якості атмосферного повітря, зменшення впливу забруднення на здоров'я населення та екосистеми. Незалежно від країни, система моніторингу базується на принципах системності, наукового підходу та інтеграції сучасних технологій. Україна, як і багато інших держав, орієнтується на рекомендації Всесвітньої організації охорони здоров'я та гармонізує своє законодавство відповідно до європейських стандартів, зокрема Директиви 2008/50/ЄС.

Важливою спільною рисою є впровадження цифрових технологій. У країнах Європейського Союзу, США, Китаї та інших державах активно використовуються системи, що базуються на обробці великих даних, супутниковому моніторингу та штучному інтелекті. Ці інновації дають змогу забезпечити високий рівень точності та оперативності виявлення змін у якості повітря. Подібні тенденції простежуються й в Україні. Такі проекти, як «ЕкоСистема» та SaveEcoBot, уже використовують цифрові платформи для збору й обробки даних, забезпечуючи відкритий доступ до інформації для громадськості.

Проте системи моніторингу атмосферного повітря в Україні мають суттєві відмінності від закордонних аналогів. Однією з ключових проблем залишається технічне оснащення. У той час як у країнах ЄС і США використовуються сучасні автоматизовані станції моніторингу, супутникові технології та мережі датчиків, українська інфраструктура часто не відповідає сучасним стандартам. Багато станцій потребують модернізації, а мережа моніторингу має обмежене покриття, що не дозволяє отримувати повну картину забруднення в масштабах країни.

Ще однією важливою відмінністю є фінансування систем моніторингу. У розвинених країнах ці програми отримують суттєву підтримку з боку держави, що дає змогу впроваджувати новітні технології та проводити комплексні дослідження. В Україні недостатнє фінансування часто стримує розвиток системи, а процес її модернізації залежить від підтримки міжнародних організацій та донорів.

Варто зазначити, що в багатьох країнах світу громадські ініціативи відіграють важливу роль у підвищенні ефективності моніторингу. Наприклад, у США та країнах ЄС активно розвиваються проекти, які залучають волонтерів і громадські організації до моніторингу якості повітря. Це дозволяє розширювати мережу спостережень, залучаючи портативні датчики, інтегруючи дані в загальнонаціональні платформи. В Україні також є позитивний приклад – ініціатива «ЕкоСіті», яка створила мережу з понад 200 станцій моніторингу, доступних для місцевих органів влади та громадян.

На міжнародному рівні спостерігається активна інтеграція екологічної політики із сучасними інструментами сталого розвитку. Наприклад, у ЄС запроваджено механізм СВМ, який стимулює скорочення промислових викидів шляхом впровадження карбонових податків. Це не лише сприяє зниженню рівнів забруднення повітря, але й стимулює використання відновлюваних джерел енергії та сучасних технологій у країнах-експортерах. В Україні подібні

механізми ще не впроваджені, хоча адаптація міжнародних практик може значно підвищити ефективність боротьби із забрудненням.

Україна перебуває на етапі активної адаптації своєї системи моніторингу до європейських стандартів. Гармонізація законодавства, оновлення технічної бази, розширення громадських ініціатив і використання сучасних цифрових інструментів є ключовими напрямками вдосконалення. Інтеграція України в міжнародні платформи, такі як програма Copernicus, може забезпечити більш точний і повний аналіз стану повітря, а також сприяти реалізації ефективних екологічних стратегій на національному рівні.

Таким чином, досвід закордонних країн і порівняння з українською практикою показують, що розвиток системи моніторингу атмосферного повітря вимагає комплексного підходу, що включає модернізацію інфраструктури, активне залучення громадськості, збільшення фінансування та інтеграцію міжнародного досвіду. Це дозволить створити ефективну систему, здатну відповідати викликам сучасної екологічної ситуації.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОВІТРЯ АГЛОМЕРАЦІЇ «ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ»

3.1 Характеристика агломерації «Хмельницький»

Агломерації представляють собою специфічну форму територіальної організації, яка об'єднує групу населених пунктів, зокрема місто та прилеглі до нього території, пов'язані між собою економічними, соціальними, культурними та інфраструктурними зв'язками. У контексті екологічного управління агломерації розглядаються як ефективний інструмент для забезпечення сталого розвитку, інтеграції територій, оптимізації управління ресурсами та моніторингу стану довкілля.

Створення агломерацій обумовлено необхідністю вирішення спільних проблем, таких як урбанізація, погіршення екологічної ситуації, зростання антропогенного навантаження на довкілля, потреба в розбудові транспортної, соціальної та екологічної інфраструктури. У разі успішного функціонування, агломерації сприяють підвищенню якості життя населення завдяки раціональному використанню ресурсів, координації діяльності громад та забезпеченню екологічної безпеки.

Основними критеріями створення агломерацій є:

- демографічні показники – наявність значної кількості населення на компактній території;
- економічна взаємодія – інтеграція промислових, транспортних та комунальних підприємств;
- інфраструктурна цілісність – єдність транспортної та інженерної інфраструктури;
- соціальна взаємодія – наявність культурних, освітніх та рекреаційних зв'язків між населеними пунктами;

– екологічний чинник – спільність екологічних проблем, які потребують узгоджених рішень.

Процес створення та функціонування агломерацій в Україні ретельно регулюється національним законодавством. Цей комплексний підхід забезпечує правові основи для об'єднання територіальних громад, спільного планування розвитку та ефективного використання ресурсів.

Одним із ключових документів, що визначає правові засади місцевого самоврядування, є Закон України «Про місцеве самоврядування в Україні». Саме цей закон регулює взаємодію громад у межах територіальних утворень і створює правові передумови для співпраці між ними.

Паралельно з цим, Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» встановлює чіткі правила для планування розвитку територій. Цей закон визначає порядок розроблення генеральних планів, детальних планів територій та інших містобудівних документів, які є необхідними для створення та розвитку агломерацій.

Закон України «Про засади державної регіональної політики» виходить на більш стратегічний рівень, визначаючи основні напрями розвитку регіонів. У цьому законі чітко прописано, що створення агломерацій є одним із пріоритетних напрямів регіонального розвитку, оскільки сприяє збалансованому розвитку територій та підвищенню їх конкурентоспроможності.

Важливим стратегічним документом є Державна стратегія регіонального розвитку на період до 2027 року. У цій стратегії особлива увага приділяється формуванню сталих територіальних об'єднань, до яких відносяться і агломерації. Такий підхід спрямований на забезпечення збалансованого розвитку та екологічної стабільності територій.

Для надання практичної допомоги у створенні та функціонуванні агломерацій, Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України розробило Методичні рекомендації. Цей документ містить детальні

роз'яснення щодо організаційних, фінансових та інших аспектів створення агломерацій, а також надає практичні поради для місцевих органів влади.

Таким чином, нормативно-правова база, що регулює створення агломерацій в Україні, є досить розвиненою і охоплює різні аспекти цього процесу. Це свідчить про розуміння важливості агломерацій для розвитку країни та прагнення забезпечити ефективну координацію зусиль на всіх рівнях управління.

Рішення про створення Хмельницької агломерації було ухвалене на основі аналізу демографічних, економічних та урбаністичних показників, що відображено в регіональних стратегічних документах, зокрема в «Регіональній стратегії розвитку Хмельницької області на 2021–2027 роки». За цими даними, Хмельницький із прилеглими територіями має всі ознаки агломераційного утворення: високу щільність населення, зосередження промислового і соціального потенціалу, розвиток транспортної мережі.

Агломерація «Хмельницький» характеризується екологічною та географічною специфікою, що знайшло відображення у Програмі моніторингу якості атмосферного повітря на 2022–2026 роки.

Агломерація «Хмельницький» розташована на площі 93,05 км² у південно-західній частині України, на Волино-Подільській височині. Протяжність території складає 15 км із північного заходу на південний схід, і 10 км у поперечному напрямку. Місто межує з такими агломераціями як Житомир (153 км), Вінниця (110 км) та Чернівці (146 км). Це обласний центр Хмельницької області з важливим адміністративним і економічним значенням.

Станом на 2021 рік чисельність населення агломерації складає 271 748 осіб, серед яких 51 120 дітей та 55 337 осіб похилого віку. Щільність населення досить висока – 2920,45 осіб/км².

Агломерація «Хмельницький» розташована у межах лісостепової зони з хвилясто-рівнинним рельєфом. Максимальні висоти досягають 389 метрів на

північній околиці міста, а мінімальні – 277 метрів у долинах річок. Клімат у регіоні помірно континентальний, зі середньою швидкістю вітру від 2,6 м/с до 4,2 м/с, і переважанням південно-східного напрямку вітру.

Основною річкою є Південний Буг, який протікає через місто та має кілька приток, включаючи річки Кудрянка та Плоска. У 1956 році на Південному Бузі створено міське водосховище для відпочинку та промислового водопостачання.

Місто має значну зелену зону, що включає парки, сквери та алеї. Природно-заповідний фонд міста охоплює 22 об'єкти загальною площею 191,75 га, що є основою екологічної мережі міста. Важливою екологічною складовою є Південнобузький екокоридор, що проходить через територію агломерації.

Забруднення атмосферного повітря у Хмельницькому здебільшого викликано транспортом та промисловістю. Загальна кількість транспортних засобів, зареєстрованих у місті, перевищує 43 688 одиниць, що робить автомобільні викиди значним джерелом забруднення.

Відповідно до нормативних документів, агломерація Хмельницький функціонує як інтегративна структура, яка сприяє оптимізації управління територіями. Це передбачає використання сучасних підходів до планування, таких як впровадження системи моніторингу стану довкілля з метою виявлення екологічних загроз та розробки заходів для їх мінімізації. Розвиток агломерації також відповідає цілям європейської інтеграції, які передбачають гармонізацію екологічного законодавства України із нормами Європейського Союзу.

Таким чином, утворення агломерації Хмельницький є прикладом успішного поєднання географічних, економічних та соціальних чинників, що сприяють підвищенню ефективності управління територіями. Подальший розвиток цієї агломерації залежить від інтеграції екологічних ініціатив, зокрема оптимізації системи моніторингу атмосферного повітря, яка є однією з ключових умов забезпечення сталого розвитку регіону [51].

3.2 Аналіз системи державного моніторингу в галузі атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький» та його реалізації

Моніторинг якості атмосферного повітря є критично важливою складовою системи екологічного управління. Особливо це актуально для великих міст і агломерацій, де значна кількість джерел забруднення негативно впливає на довкілля та здоров'я населення. Для регіонів із високим рівнем урбанізації, таких як Хмельницький, ефективна система моніторингу дозволяє вчасно виявляти критичні рівні забруднення, впроваджувати відповідні заходи для покращення стану повітря та інформувати населення про поточний стан екологічної ситуації.

Агломерація «Хмельницький» здійснює державний моніторинг у галузі охорони атмосферного повітря на основі «Програми моніторингу атмосферного повітря на 2022–2026 роки». Ця програма затверджена хмельницькою міською радою та відповідає сучасним екологічним вимогам і стандартам, визначеним законодавством України.

Моніторинг якості повітря в агломерації Хмельницький здійснюється відповідно до постанови Кабінету Міністрів України № 827 від 14 серпня 2019 року. Основні принципи програми зосереджені на попередній оцінці просторового розподілу концентрацій забруднювальних речовин, визначенні джерел забруднення та здійсненні регулярних вимірювань рівнів забруднення. Це дозволяє фіксувати зміни в якості повітря та вживати необхідні заходи для його покращення.

Одним із головних завдань системи моніторингу є ідентифікація джерел забруднення повітря. Стаціонарні джерела до них належать промислові підприємства, котельні та інші об'єкти, що використовують паливні ресурси. Станом на 2020 рік кількість таких об'єктів у місті становила 68 одиниць. Вони здійснюють значний вплив на якість повітря в окремих районах міста.

Пересувні джерела, автомобільний транспорт є головним джерелом забруднення в агломерації «Хмельницький». Збільшення кількості транспортних засобів із 15 тис. у 2016 році до понад 43 тис. у 2020 році призводить до значного зростання концентрацій оксидів азоту та оксиду вуглецю.

Будівництво та інші антропогенні фактори, зростання кількості будівельних майданчиків збільшує рівень пилу та дрібних суспендованих частинок у повітрі.

Згідно з даними, загальний обсяг викидів забруднювальних речовин у період з 2016 року по 2020 рік мав тенденцію до зниження (з 1,037 тис. тонн до 0,859 тис. тонн). Це свідчить про ефективність частини заходів, але транспорт продовжує залишатися основним викликом.

Передбачені два основні методи проведення моніторингу: довгострокові вимірювання та індикативні оцінки. Мережа моніторингу складається з двох стаціонарних пунктів, розташованих у різних частинах міста. Основними контрольованими речовинами є діоксид азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, а також тверді частинки (PM 10 і PM 2.5), які значно впливають на якість повітря і здоров'я населення.

Основу діючої системи моніторингу в Хмельницькому становлять стаціонарні пункти спостереження, які функціонують уже багато років.

Пункт № 1 на вул. Чорновола, 122 (міський фоновий) контролює діоксид сірки, азоту, оксид вуглецю, пилові частки (PM 10, PM 2,5), важкі метали (кадмій, нікель, свинець та ін.).

Пункт № 2 на розі вул. Шухевича та Олімпійської контролює подібні показники, а також опади та іонний склад повітря.

Результати вимірювання показників якості атмосферного повітря на стаціонарних пунктах спостереження за 2022-2024 роки, наведені на рисунку 3.1.

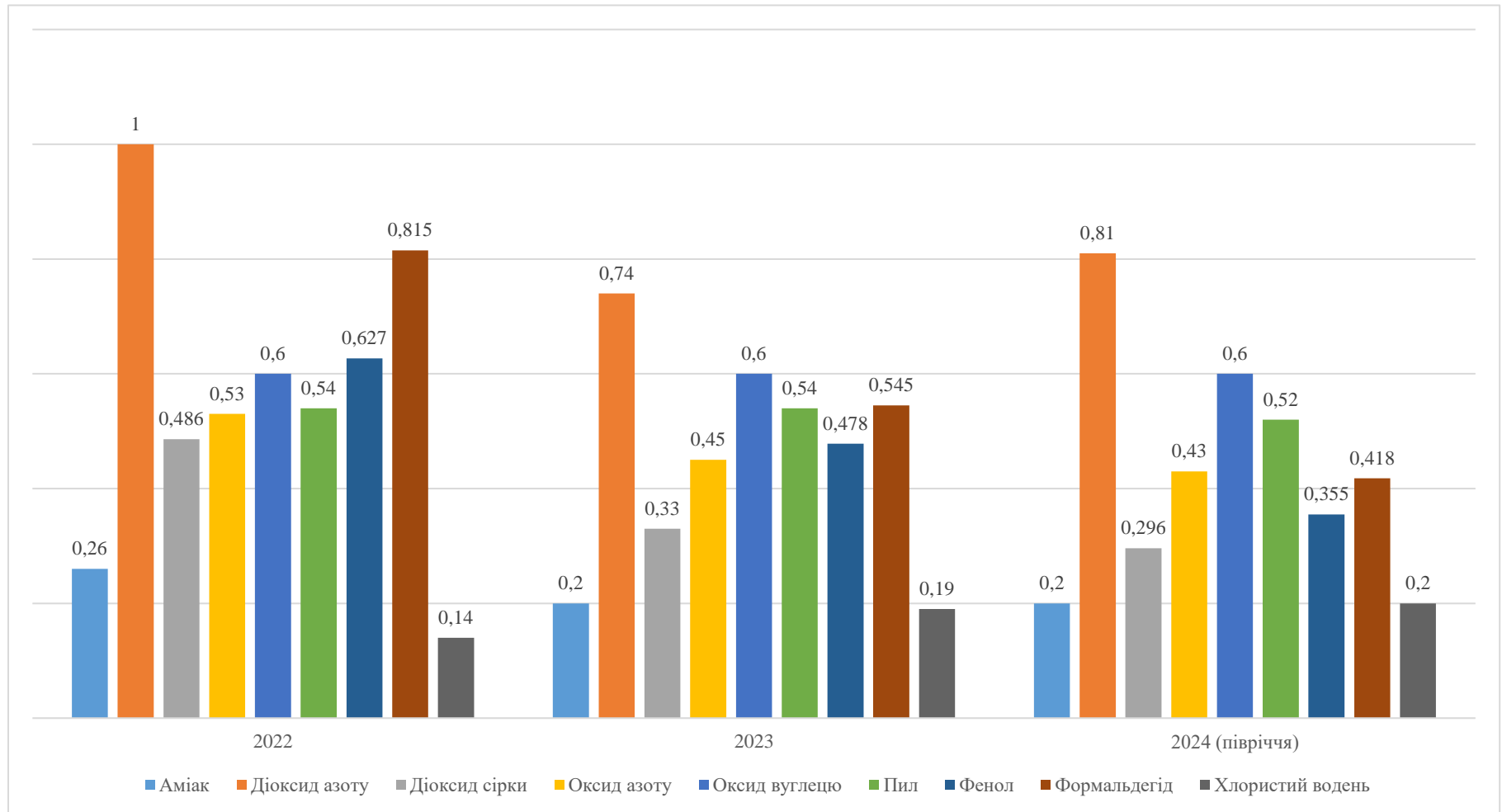


Рисунок 3.1 – Показники якості атмосферного повітря з 2022 по 2024 роки у кратності ГДК

Згідно з даними з 2022 року по 2024 роки, спостерігається така динаміка в концентраціях основних забруднювачів у повітрі:

– аміак у 2022 році концентрація аміаку становила $0,26 \text{ мг/м}^3$, після чого відбулося зниження до $0,2 \text{ мг/м}^3$ у 2023 році і 2024 роках. Це свідчить про покращення екологічної ситуації щодо вмісту аміаку у повітрі;

– діоксид азоту, показники варіюються: зниження від 1 мг/м^3 у 2022 році до $0,74 \text{ мг/м}^3$ у 2023 році, однак у першому півріччі 2024 року значення збільшилося до $0,81 \text{ мг/м}^3$, що може свідчити про незначне погіршення якості повітря;

– діоксид сірки у 2022 році рівень діоксиду сірки становив $0,48 \text{ мг/м}^3$, але спостерігається постійне зниження до $0,29 \text{ мг/м}^3$ у 2024 році, що свідчить про зниження викидів цього забруднювача;

– оксид азоту, показники також демонструють тенденцію до зменшення – від $0,53 \text{ мг/м}^3$ у 2022 році до $0,43 \text{ мг/м}^3$ у 2024 році;

– оксид вуглецю, концентрації залишаються стабільними на рівні $0,6 \text{ мг/м}^3$ протягом усіх років, що може свідчити про постійний характер джерел викидів цієї речовини;

– фенол та формальдегід, обидва забруднювачі демонструють значне зниження концентрацій. Для фенолу – від $0,62 \text{ мг/м}^3$ у 2022 році до $0,35 \text{ мг/м}^3$ у 2024 році, а для формальдегіду – від $0,81 \text{ мг/м}^3$ до $0,41 \text{ мг/м}^3$ за той самий період;

– хлористий водень, відзначається підвищення концентрацій – від $0,14 \text{ мг/м}^3$ у 2022 році до $0,2 \text{ мг/м}^3$ у 2024 році, що потребує додаткової уваги до джерел викидів цієї речовини;

Дані, отримані в процесі моніторингу, вказують на те, що якість атмосферного повітря в місті залишається під впливом кількох ключових чинників. Насамперед, це транспорт, який формує основну частину викидів оксиду вуглецю та оксидів азоту. Особливо високі концентрації цих речовин спостерігаються у години пік, коли інтенсивність транспортного руху досягає

максимуму. Окрім транспорту, значний вплив надають промислові підприємства, які здійснюють викиди сірчаних та азотних сполук. Хоча частина підприємств модернізувала своє обладнання, впровадження новітніх екологічних технологій залишається недостатньо поширеним.

Діюча система моніторингу має низку недоліків:

- обмежена мережа спостережень – лише два пункти спостереження не забезпечують повного охоплення території агломерації;
- відсутність автоматизації – більшість процесів досі виконується вручну, що уповільнює отримання даних і їхню обробку;
- недостатній рівень інформування громадськості – дані моніторингу не завжди доступні в режимі реального часу, що ускладнює інформування населення про екологічну ситуацію;
- відсутність інтеграції до національної системи моніторингу, це унеможлиблює створення єдиної бази даних для аналізу загальнодержавної екологічної ситуації.

Необхідність модернізації системи моніторингу стає особливо очевидною в контексті змін клімату, що впливають на локальні погодні умови, а також зростання населення агломерації. З кожним роком навантаження на екосистему міста зростає, тому своєчасне оновлення обладнання, збільшення кількості точок спостережень та впровадження сучасних технологій є критично важливими.

Загалом, аналіз ефективності державного моніторингу в агломерації «Хмельницький» свідчить про те, що існуюча система здатна забезпечити базові потреби у зборі та обробці інформації про стан атмосферного повітря. Однак для досягнення більш амбітних цілей, таких як значне зниження рівня забруднення або повна інтеграція у міжнародні екологічні стандарти, необхідно впроваджувати системні зміни. Це передбачає не лише технічні оновлення, але й тісну співпрацю з промисловими підприємствами, розробку локальних програм

стимулювання екологічно чистих технологій, а також активізацію участі громадян у моніторингу стану довкілля [52–54].

3.3 Напрямки оптимізації системи державного моніторингу для агломерації «Хмельницький»

Якість атмосферного повітря є одним із ключових факторів, що визначають рівень життя та здоров'я населення. З огляду на інтенсивний розвиток міської інфраструктури, зростання кількості транспорту та промислової діяльності, забезпечення ефективного моніторингу повітря стає невідкладним завданням.

З урахуванням недоліків системи моніторингу атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький» для виявлення поточного стану якості повітря та визначення шляхів покращення існуючої системи моніторингу були проведені дослідження по визначенню вмісту дисперсних частинок пилу.

Особливу увагу було приділено вивченню концентрацій зважених часток PM10 і PM2.5, оскільки вони є одними з найбільш небезпечними для здоров'я людини забруднювачів. Ці частки можуть проникати глибоко в дихальні шляхи та викликати серйозні захворювання. У рамках дослідження визначено ключові вулиці міста, на яких проводилися заміри, та проаналізовано отримані результати з метою подальшого вдосконалення системи моніторингу.

Заміри проводилися за допомогою високоточного портативного пристрою Particle Counter NT-9600 (рисунки 3.2–3.3), що здатний фіксувати концентрацію зважених часток у реальному часі. Цей пристрій обрано завдяки його високій чутливості, портативності та зручності у використанні.

NT-9600 має кілька функціональних переваг, зокрема:

- широкий діапазон вимірювання часток у повітрі, що дозволяє аналізувати як дрібні частки PM2.5, так і більші PM10;



Рисунок 3.2 – Particle Counter HT-9600

- висока точність, що забезпечується лазерною технологією вимірювання;
- можливість зберігання даних та їх подальшої обробки;
- компактний розмір, що дозволяє використовувати його в польових умовах без необхідності складного монтажу.

Для забезпечення репрезентативності результатів дослідження були обрані різні локації міста, які включають як центральну частину, так і периферійні райони з високим рівнем транспортного та промислового навантаження, зокрема це такі локації:

- район заводу Катіон;
- район ТЦ «Либідь плаза»;
- вул. Прибузька;
- вул. Зарічанська;
- мікрорайон Раково (біля заводу АДВІС);
- Проспект Миру;
- містечок біля залізничних колій.



Рисунок 3.3 – Вимірювання часточок РМ

Проведення замірів у цих точках дозволило отримати широкий спектр даних про рівень забруднення в різних частинах міста.

Для оцінки результатів використовувалися нормативи, встановлені Директивою 2008/50/ЄС. Згідно з цією директивою, середньодобовий рівень РМ10 не повинен перевищувати 50 мкг/м³, а РМ2.5 – 25 мкг/м³. Відповідність цим нормативам є важливою умовою забезпечення безпечного середовища для життя.

Аналіз отриманих даних дозволив побудувати графік перевищень ГДК (рисунок 3.4).

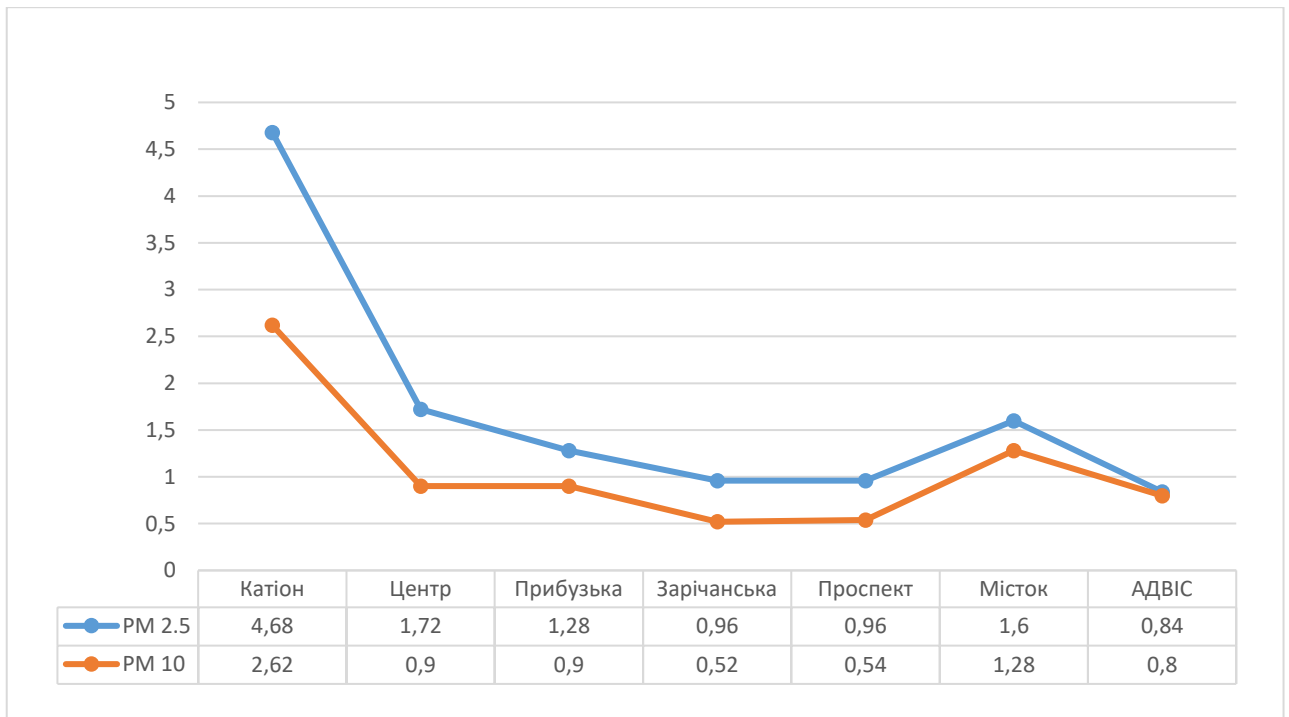


Рисунок 3.4 – Графік кратності перевищення норми вмісту показників PM 2.5 та PM 10

Результати замірів засвідчили наявність перевищення встановлених нормативів на окремих ділянках міста. У районі вулиці Катіон було зафіксовано найвищі показники забруднення повітря: концентрація PM2.5 становила 117 мкг/м³, а PM10 – 131 мкг/м³. Це може бути зумовлено значним впливом промислових підприємств, які розташовані поблизу. Промислові процеси, викиди шкідливих речовин і підвищена запиленість сприяють накопиченню частинок у повітрі, створюючи критично високий рівень забруднення.

У центральній частині міста, зокрема біля Либідь Плаза, зафіксовано концентрацію PM2.5 на рівні 43 мкг/м³, а PM10 – 47 мкг/м³.

Подібна ситуація спостерігається на вулиці Прибузькій, де рівень PM2.5 становив 32 мкг/м³, а PM10 – 46 мкг/м³. Основною причиною таких показників є інтенсивний транспортний рух, який супроводжується викидами вихлопних газів і механічним підйомом пилу. Додатково, недостатня кількість озеленення в

центральної частині міста сприяє накопиченню пилу та зменшує здатність природного очищення повітря.

У районі місточка біля залізничних колій концентрація $PM_{2.5}$ склала 40 мкг/м^3 , а PM_{10} – 42 мкг/м^3 . Такі показники пояснюються інтенсивним рухом залізничного транспорту, викидами від локомотивів та механічним підйомом пилу. Залізнична інфраструктура, яка є значним джерелом забруднення, створює несприятливі умови для якості повітря на прилеглих територіях.

У районах вулиці Зарічанської та Проспекту Миру зафіксовано найнижчі рівні забруднення серед усіх ділянок: концентрація $PM_{2.5}$ становила 24 мкг/м^3 , а PM_{10} – 26 мкг/м^3 і 27 мкг/м^3 відповідно. Це свідчить про менший вплив транспортного руху та промислових викидів у цих районах, а також кращі умови озеленення.

У мікрорайоні Раково, поблизу підприємства АДВІС, рівні $PM_{2.5}$ становили 32 мкг/м^3 , а PM_{10} – 40 мкг/м^3 . Ці показники свідчать про помірний вплив промислових джерел забруднення, а також транспортного навантаження, яке є характерним для цього району.

Таким чином, результати дослідження демонструють суттєві відмінності у рівнях забруднення повітря залежно від розташування ділянок. Основними факторами перевищення нормативів є інтенсивний транспортний рух, близькість до промислових зон та недостатній рівень озеленення. Для покращення ситуації необхідно впроваджувати заходи з оптимізації транспортних потоків, посилення контролю за промисловими викидами та збільшення кількості зелених насаджень у місті.

Для візуалізації отриманих результатів створено карту забруднення (рисунок 3.5), що ілюструє рівень концентрацій часток PM_{10} і $PM_{2.5}$ на кожній з досліджуваних локацій. Це дозволяє не лише оцінити загальний стан повітря, але й виявити критичні точки, що потребують негайного втручання.

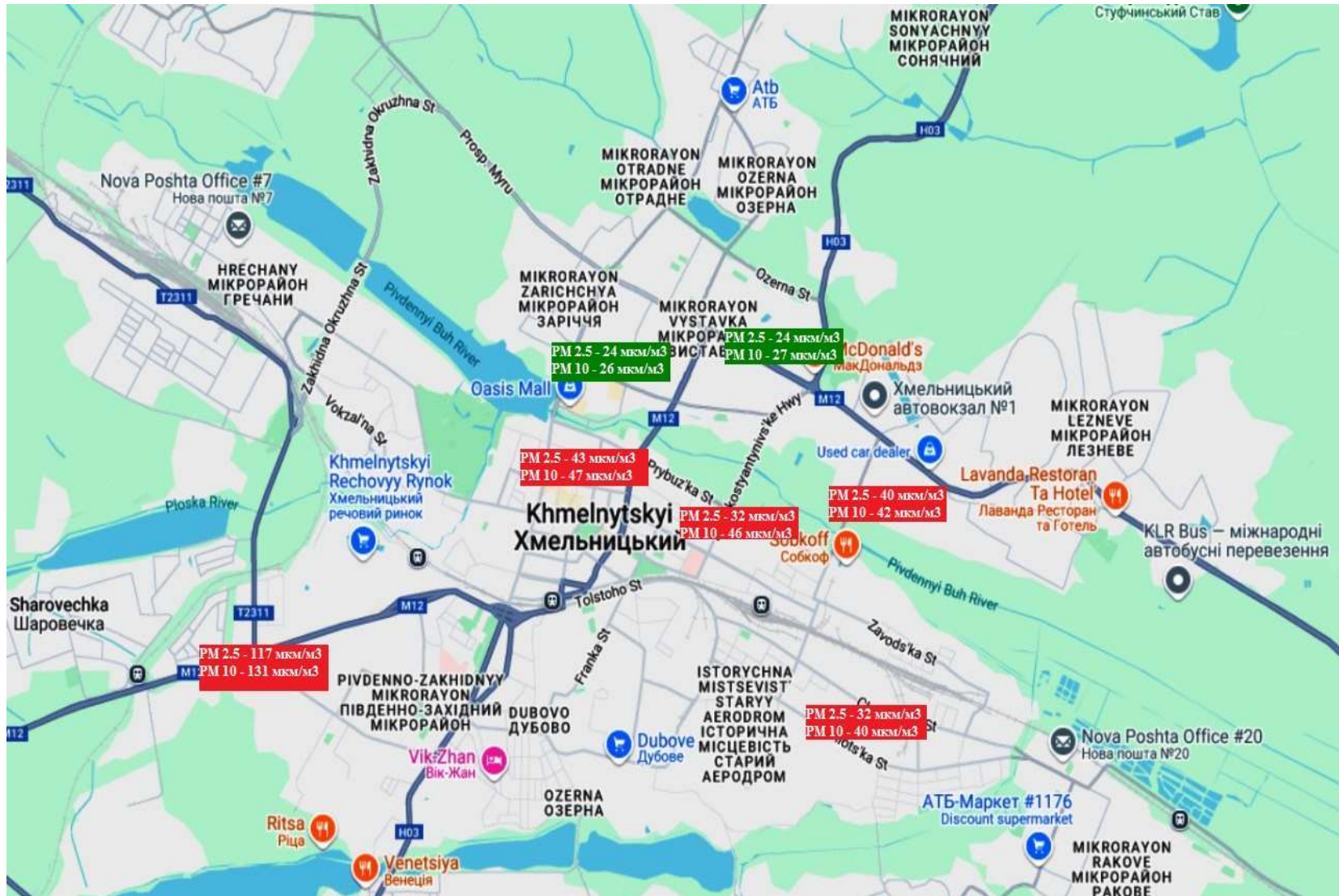


Рисунок 3.5 – Карта забруднення атмосферного повітря частками PM10 і PM2.5

На карті червоним кольором відображено рівні концентрації забруднюючих речовин, що перевищують гранично допустимі норми, тоді як зелений колір використовується для позначення ділянок з допустимими рівнями забруднення.

Дослідження забруднення атмосферного повітря за вмістом пилу засвідчили, що існуюча система стаціонарних пунктів (постів) спостереження не є ефективною, оскільки не забезпечує врахування ситуації на всій території міста, зокрема, на ділянках з активним рухом автотранспорту.

З урахуванням цього для оптимізації системи моніторингу атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький» рекомендується використання пересувних постів спостереження, що є важливим елементом для забезпечення комплексного контролю якості повітря.

Пересувні пости дозволяють проводити вимірювання в різних точках міста, включаючи зони з підвищеним рівнем забруднення, промислові райони, транспортні магістралі та житлові квартали. Їх мобільність забезпечує оперативне реагування на локальні джерела забруднення, надзвичайні ситуації або різкі зміни у складі атмосферного повітря. Крім того, пересувні пости сприяють оптимізації витрат на моніторинг, оскільки дозволяють охопити більшу територію без необхідності встановлення стаціонарних станцій у кожній зоні.

Впровадження автоматизованих систем збору та аналізу даних, зокрема на основі технологій IoT, дозволить підвищити точність моніторингу. Використання таких систем забезпечить своєчасне інформування відповідних служб про перевищення нормативів. Крім того, застосування алгоритмів машинного навчання може допомогти прогнозувати рівень забруднення на основі історичних даних.

Публічний доступ до даних про стан атмосферного повітря сприятиме підвищенню обізнаності населення та стимулюватиме екологічно відповідальну поведінку. Інтерактивна платформа, яка відображатиме поточний стан повітря у

реальному часі, може стати важливим інструментом для залучення громади до вирішення екологічних проблем. Окрім цього, платформа може включати рекомендації для громадян щодо поведінки у разі підвищеного рівня забруднення.

Зважаючи на специфіку міста Хмельницького, необхідно адаптувати загальнодержавні стандарти до місцевих умов. Це дозволить врахувати унікальні особливості міста та забезпечити ефективніше регулювання рівнів забруднення.

Проведене дослідження підтвердило актуальність проблеми забруднення атмосферного повітря в агломерації Хмельницький та необхідність вдосконалення існуючої системи моніторингу. Запропоновані заходи спрямовані на підвищення ефективності контролю за якістю повітря, зниження рівнів забруднення та створення сприятливих умов для здоров'я та комфорту мешканців міста. Реалізація цих ініціатив дозволить забезпечити відповідність європейським стандартам та сприятиме сталому розвитку регіону.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто історичні аспекти забруднення атмосферного повітря, що формувалися із розвитком та збільшенням масштабів антропогенної діяльності. Схарактеризовано основні природні та антропогенні джерела забруднення повітря та їх вплив на стан довкілля. Серед останніх найбільш потужними джерелами в урбоекосистемах є автотранспорт та промисловість. Визначено найбільші за обсягами забруднюючі речовини, що включають пилові дисперсні частинки, оксиди азоту та сірки, ЛОС, парникові гази.

Проаналізовано системи державного і громадського моніторингу атмосферного повітря в Україні. Правовою базою моніторингу виступають Закон України «Про охорону атмосферного повітря» та Постанова Кабінету Міністрів України № 827 від 14 серпня 2019 р. «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря»

У межах роботи досліджено аспекти моніторингу якості атмосферного повітря як ключового інструменту для оцінки його стану, аналізу та прогнозування змін.

Державний моніторинг стану атмосферного повітря здійснюється в межах зон (частин території держави, визначених для цілей моніторингу та управління якістю атмосферного повітря, зокрема зонами прийнято вважати території областей) та агломерацій (територія з населенням понад 250 тис. осіб, визначена для цілей моніторингу та управління якістю атмосферного повітря).

За останні 20 років в Україні виникло чимало громадських ініціатив, що забезпечують доступ до актуальних даних. Наприклад, проект «ЕкоСіті» Система базується на сенсорах, що вимірюють вміст дрібнодисперсного пилу (PM_{2.5} і PM₁₀), температуру та вологість повітря. Дані передаються на сервер у режимі реального часу, обробляються та виводяться на інтерактивну карту. Станом на

2024 рік мережа «ЕкоСіті» охоплює понад 200 станцій моніторингу по всій Україні.

Одним із лідерів у впровадженні системного підходу до моніторингу повітря є Європейський Союз. Основою європейської системи моніторингу є Європейська мережа моніторингу якості повітря (Air Quality Monitoring Network), що охоплює понад 4 000 станцій у країнах-членах ЄС. Значну роль відіграє програма Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), яка використовує супутникові дані для прогнозування забруднення, аналізу джерел і створення карт поширення забруднювачів. Подібні підходи використані в таких країнах, як США, Китай, Японія тощо.

Вивчення особливостей функціонування систем моніторингу в Україні та за кордоном дало можливість визначити їхні сильні та слабкі сторони. Встановлено, що однією з ключових проблем залишається технічне оснащення. У той час як у країнах ЄС, США, Японії, Китаю використовуються сучасні автоматизовані станції моніторингу, супутникові технології та мережі датчиків, українська інфраструктура часто не відповідає сучасним стандартам. Багато станцій потребують модернізації, а мережа державного моніторингу має обмежене покриття, що не дозволяє отримувати повну картину забруднення, як у масштабах країни, так і в межах окремих зон та агломерацій.

Особливу увагу в роботі приділено аналізу системи державного моніторингу атмосферного повітря в агломерації «Хмельницький», яка функціонує в межах сучасних екологічних стандартів, затверджених законодавством України.

Дослідження щодо вмісту зважених частинок PM10 і PM2.5, яке було проведено нами в агломерації «Хмельницький» у різних локаціях міста, що включають як центральну, так і периферійні райони з високим рівнем транспортного та промислового навантаження, показали значні перевищення. Ці

результати дозволили ідентифікувати зони з найбільшим рівнем забруднення та створити карту забруднення міста.

На основі отриманих даних надано рекомендації щодо вдосконалення системи моніторингу. Зокрема, запропоновано впровадження сучасних автоматизованих станцій, використання пересувних постів спостереження та підключення до міжнародних платформ обміну даними. Такі заходи сприятимуть підвищенню ефективності контролю за якістю повітря, зниженню рівнів забруднення та створенню сприятливих умов для життя мешканців.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Renberg I. Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments / I. Renberg, M. W. Persson, O. Emteryd // *Nature*. – 1994. – № 368. – P. 323–326. – Режим доступу : <https://www.nature.com/articles/368323a0> (дата звернення: 09.11.2024).
2. Brimblecombe P. *The Big Smoke: A History of Air Pollution in London since Medieval Times* / P. Brimblecombe. – London : Routledge, 1987. – P. 185.
– Режим доступу: https://books.google.com.ua/books/about/The_Big_Smoke.html?id=bx4wAFE8xGU&redir_esc=y (дата звернення: 11.11.2024).
3. Bell M. L. A retrospective assessment of mortality from the London Smog Episode of 1952 / M. L. Bell, D. L. Davis, T. Fletcher // *Urban ecology*. – Springer, 2004. – P. 263–268.
– Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1241789/> (дата звернення: 06.11.2024).
4. Офіційний сайт European Commission. Air Quality Standards [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en.
5. Войтків П. С. Конструктивно-географічні дослідження урбосистем : навчальний посібник / П. С. Войтків. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2019. – 118 с. – Режим доступу: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/01/Voytkiv-P.-S.-Konstruktyvno-heohrafichni-doslidzhennia-urbosystem-book.pdf> (дата звернення: 11.11.2024).
6. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» [Електронний ресурс] : закон України прийнято Верховною Радою України 16 жовт. 1992 р.

(офіц. текст : за станом на 15 лист. 2024 р.). – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text> (дата звернення: 08.11.2024).

7. Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» [Електронний ресурс] : закон України прийнято Верховною Радою України 01 січн. 2020 р. (офіц. текст: за станом на 01 січн. 2020 р.). – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 04.11.2024).

8. Джерела забруднення атмосфери: природні та антропогенні [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. osvita.ua. – Режим доступу : <https://osvita.ua/vnz/reports/ecology/21295/> (дата звернення: 06.11.2024).

9. Кривенко Г. М. Аналіз викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами [Електронний ресурс] / Г. М. Кривенко, Л. В. Возняк, В. О. Зорін // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2019. – № 1. – С. 85–93. – Режим доступу: <https://dntb.gov.ua/wp-content/uploads/2018/10/%D0%92%D1%96%D0%B4%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B8-IV%D0%BA%D0%B2.-2019.pdf> (дата звернення: 17.11.2024).

10. Мельниченко С. Г. Динаміка викидів забруднюючих речовин стаціонарними та пересувними джерелами забруднення в межах України [Електронний ресурс] / С. Г. Мельниченко, Л. М. Богадьорова, І. В. Охременко // Людина та довкілля. Проблеми неоекології. – 2023. – Вип. 40. – С. 42–52. – Режим доступу : <http://dspace.ksaeu.kherson.ua/handle/123456789/8497> (дата звернення: 13.11.2024).

11. Чому виникає хронічне обструктивне захворювання легень [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Міністерства охорони здоров'я України – Режим доступу : <https://moz.gov.ua/uk/chomu-vikikae-hronichne-obstruktivne-zahvorjuvannja-legen-i-jak-jogo-uniknuti> (дата звернення: 29.10.2024).

12. Офіційний сайт World Health Organization (WHO). Air pollution and health. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1 (дата звернення: 24.11.2024).
13. Офіційний сайт European Environment Agency. Air quality in Europe – 2020 report. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/> (дата звернення: 21.11.2024).
14. Офіційний сайт US Environmental Protection Agency (EPA). Health effects of hazardous air pollutants. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.epa.gov/> (дата звернення: 24.10.2024).
15. Офіційний сайт Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change and Land. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ipcc.ch/> (дата звернення: 28.10.2024).
16. Зеркалов Д. В. Інженерна екологія: проблеми, моніторинг, управління: монографія / Д. В. Зеркалов, К. Н. Ткачук, К. К. Ткачук. – Київ : Основа, 2011. – 580 с.
17. Шовган А. Д. Біологія. Дендрологія з основами екології рослин : конспект лекцій / А. Д. Шовган, Ю. А. Мельник. – Львів : УкрДЛТУ, 2004. – 96 с.
18. Никифоров В. В. Біоіндикація та біотестування : навч. посібник. / В. В. Никифоров, С. В. Дігтяр, О. В. Мазницька. – Кременчук : ПП Щенбатих, 2016. – 96 с.
19. Архітектурно-містобудівні та соціально-економічні передумови формування зеленої інфраструктури [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. ОДАБА – Режим доступу : <http://mx.odaba.edu.ua/handle/123456789/9167>. (дата звернення: 13.11.2024).
20. Викиди забруднюючих речовин і парникових газів у атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. Держстат України – Режим доступу :

https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch_vzrap_u.htm. (дата звернення: 12.11.2024).

21. Офіційний сайт World Health Organization (WHO). Climate impacts of air pollution. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/health-impacts/climate-impacts-of-air-pollution> (дата звернення: 19.11.2024).

22. Екологічний моніторинг. – [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України – Режим доступу : <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamku/ekologichnyj-monitoryng/> (дата звернення: 16.11.2024).

23. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря. [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. zakon.rada.gov.ua. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/343-99-%D0%BF#Text> (дата звернення: 30.10.2024).

24. Екологічний моніторинг як засіб визначення екологічного стану навколишнього середовища [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. Громадський простір. – Режим доступу : <https://www.prostir.ua/?news=ekolohichnyj-monitorynh-yak-zasib-vyznachennya-ekolohichnoho-stanu-navkolyshnoho-seredovyscha> (дата звернення: 09.11.2024).

25. Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля [Електронний ресурс] / Офіційний сайт zakon.rada.gov.ua. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text> (дата звернення: 08.11.2024).

26. Зображення видів екологічного моніторингу [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. Загальна екологія – Режим доступу : <https://ecologyknu.wixsite.com/ecologymanual/10-1-3> (дата звернення: 10.11.2024).

27. Про затвердження Порядку погодження і видачі дозволів на провадження діяльності пов'язаної із штучними змінами стану атмосфери та атмосферних явищ у господарських цілях [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. zakon.rada.gov.ua. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/301-2002-%D0%BF#Text> (дата звернення: 01.11.2024).

28. Про Порядок розроблення та затвердження нормативів екологічної безпеки атмосферного повітря [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. zakon.rada.gov.ua. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/299-2002-%D0%BF#Text> (дата звернення: 13.11.2024).

29. Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 року про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. zakon.rada.gov.ua. – Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text (дата звернення: 11.11.2024).

30. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року [Електронний ресурс] : закон України від 28.02.2019 // Офіційний портал Верховної Ради України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19?lang=uk>. (дата звернення: 18.10.2024).

31. Закон України Про оцінку впливу на довкілля [Електронний ресурс]: закон України прийнято Верховною Радою України 23 трав. 2017 р. (офіц. текст: за станом на 04 січн. 2024 р.). – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19/ed20170523#Text> (дата звернення: 18.11.2024).

32. Постанова Кабінету міністрів України «Про Єдину екологічну платформу «ЕкоСистема» від 11 жовтня 2021 р. № 1065 / Офіційний сайт. zakon.rada.gov.ua. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1065-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 17.05.2024).

33. ЕкоСистема [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. есо.gov.ua. – Режим доступу : <https://есо.gov.ua/> (дата звернення: 06.11.2024).
34. ЕкоСіті [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. [Есо City](https://есо-city.org.ua/). – Режим доступу : <https://есо-city.org.ua/> (дата звернення: 06.11.2024).
35. SaveEcoBot [Електронний ресурс] / Офіційний сайт. [SaveEcoBot](https://www.saveecobot.com/). – Режим доступу : <https://www.saveecobot.com/> (дата звернення: 19.10.2024).
36. Офіційний сайт World Health Organization (WHO). [Global Air Quality Guidelines](https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> (дата звернення: 24.11.2024).
37. Офіційний сайт European Environment Agency (EEA). [Air Quality Monitoring Reports](https://www.eea.europa.eu/) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.eea.europa.eu/> (дата звернення: 20.11.2024).
38. Офіційний сайт United States Environmental Protection Agency (EPA). [National Air Quality Standards](https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table> (дата звернення : 13.11.2024).
39. Ministry of Ecology and Environment, China. [Air Quality Reports](https://english.mee.gov.cn/) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://english.mee.gov.cn/> (дата звернення: 19.11.2024).
40. Ministry of Environment, Forest and Climate Change, India. [National Clean Air Programme](https://moef.gov.in/) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://moef.gov.in/> (дата звернення: 14.11.2024).
41. Basic Environment Plan, Japan. Ministry of the Environment of Japan [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.env.go.jp/en/laws/policy/basic_lp.html (дата звернення: 24.11.2024).
42. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). [Overview and Data Insights](https://atmosphere.copernicus.eu/) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://atmosphere.copernicus.eu/> (дата звернення: 24.11.2024).

43. Офіційний сайт World Health Organization (WHO). Impact of Air Pollution on Public Health and AI Integration [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.who.int/> (дата звернення: 24.11.2024).

44. AirVisual Initiative. Community-Driven Monitoring Platforms [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.iqair.com/air-quality-map> (дата звернення: 24.11.2024).

45. Citizen Science Initiative, Germany. Local Air Quality Monitoring Networks [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.citizenscience.org/> (дата звернення: 24.11.2024).

46. Environmental Defense Fund (EDF). Air Quality Mapping Initiative in Oakland [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.edf.org/> (дата звернення: 24.11.2024)

47. PurpleAir. Citizen-Powered Global Monitoring System [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.purpleair.com/> (дата звернення: 24.11.2024).

48. European Commission. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ec.europa.eu/> (дата звернення: 24.11.2024).

49. Global Climate Observing System (GCOS). Official Website [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://gcos.wmo.int/> (дата звернення: 24.11.2024).

50. АМАР, Arctic Pollution 2021. Human Health, Climate Change, and Environmental Impacts [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.amar.no/documents> (дата звернення: 24.11.2024).

51. Про затвердження Програми охорони довкілля Хмельницької міської територіальної громади на 2021–2025 роки [Електронний ресурс] : рішення п’ятої сесії Хмельницької міської ради від 21 квітня 2021 р № 69/2021. – Режим

доступу : <https://khm.gov.ua/uk/content/pro-zatverdzhennya-programy> (дата звернення: 07.11.2024).

52. Програма економічного та соціального розвитку Хмельницької міської територіальної громади на 2024 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.khm.gov.ua/uk/content/pro-zatverdzhennya-programy-ekonomichnogo-i-socialnogo-rozvytku-hmelnyckoyi-miskoyi-6> (дата звернення: 24.11.2024).

53. Стратегії розвитку міста Хмельницького до 2025 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ips.ligazakon.net/document/XM170082> (дата звернення: 27.11.2024).

54. Стратегічний план розвитку Хмельницької міської територіальної громади на 2021-2025 роки [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.khm.gov.ua/sites/default/files/pdf/%D0%A1%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%A2%D0%95%D0%93%D0%86%D0%A7%D0%9D%D0%98%D0%99%20%D0%9F%D0%9B%D0%90%D0%9D.pdf> (дата звернення: 24.11.2024).

ДОДАТОК А
(довідковий)
РЕЗУЛЬТАТИ АПРОБАЦІЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана
Огієнка

ПОДІЛЬСЬКІ ЧИТАННЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА
ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОТИЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО
РІЗНОМАНІТТЯ, ПРИРОДНИЧА ОСВІТА
ЗБІРНИК ЗА МАТЕРІАЛАМИ
ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
З МІЖНАРОДНОЮ УЧАСТЮ

ЕЛЕКТРОННЕ ВИДАННЯ



Кам'янець-Подільський
2024 р.

УДК 57+502/504+[37:5](063)
ББК 28я431
П44

Рекомендовано рішенням вченої ради
Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка
(протокол № 11 від 28.11.2024 р.)

Редакційна колегія:

- Любінська Л.Г.** – д-р. біол. наук, доцент, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;
Казанішена Н.В., - канд. пед. наук, доцент, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;
Любінський О.І. - д-р. с-г. наук, професор, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;
Матвєєв М.Д. - канд. біол. наук, доцент, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;
Міронова Н.Г. - д-р. с-г. наук, професор, Хмельницький національний університет;
Білецька Г.А. - д-р. пед. наук, професор, Хмельницький національний університет;
Касіяник І.П. – канд. геогр. наук, доцент, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;
Колодій В.А. – канд. біол. наук, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

*Відповідальність за грамотність, академічну доброчесність,
достовірність фактів і покликань несуть автори наукових праць*

Подільські читання. Дослідження, охорона довкілля та збереження біотичного та ландшафтного різноманіття, природнича освіта: Збірник за матеріалами Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю (21-22 листопада 2024 р., Кам'янець-Подільський) / [за заг. ред. Н. В. Казанішеної]. [Електронний ресурс]. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2024. 460 с.

Матеріали конференції презентують результати наукових досліджень науковців, педагогів та здобувачів вищої освіти Поділля. Присвячені проблемам дослідження, охорони довкілля, збереження біотичного та ландшафтного різноманіття, природничої освіти. Збірник наукових праць буде корисним науковцям, науково-педагогічним працівникам, здобувачам вищої освіти.

УДК 57+502/504+[37:5](063)
ББК 28я431
П44

*Відповідальність за грамотність, академічну доброчесність,
достовірність фактів і покликань несуть автори статей*

© К-ПНУ імені Івана Огієнка, 2022

УДК 504.53:504.054

**ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ДЕРЖАВНОГО МОНІТОРИНГУ
АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ АГЛОМЕРАЦІЇ «ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ»**

Н.Г. Міронова, Я.О.Гуровська

miroнова72n@ukr.net, yana.hurovska@gmail.com

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

Атмосферне повітря – це ключовий елемент природного середовища, що представляє собою природну газову суміш, яка знаходиться поза межами житлових, виробничих та інших приміщень [1].

Державний моніторинг у сфері охорони атмосферного повітря проводиться для збору, обробки, збереження та аналізу даних про стан повітря, прогнозування його змін та оцінки потенційних ризиків. Метою є розробка науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття управлінських рішень у сфері охорони повітря та навколишнього середовища, а також інформування громадян про якість повітря, його забруднення та вплив на здоров'я і життя населення.

На основі отриманих даних визначаються рівні забруднення повітря на певній території у встановлений період, а також відповідність якості повітря встановленим нормам. Здійснюється контроль ефективності заходів щодо зменшення викидів шкідливих речовин, оцінюється вплив забруднення на природу, здоров'я та життєдіяльність населення.

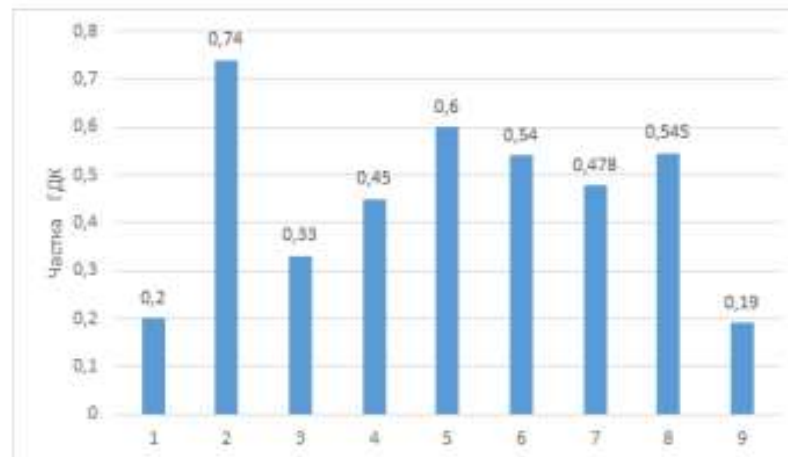
Моніторинг якості атмосферного повітря та управління ним проводяться з урахуванням поділу території України на зони та агломерації. [2].

Кількість населення міста Хмельницького в поєднанні з його промисловим потенціалом створюють умови для підвищеного рівня забруднення атмосферного повітря. Саме тому місто було виділено як окрема агломерація, що потребує ретельного моніторингу та впровадження екологічних ініціатив.

Агломерація «Хмельницький», яка охоплює площу 93,05 км² з населенням понад 271 тисячу осіб, здійснює державний моніторинг у галузі охорони атмосферного повітря на основі «Програми моніторингу атмосферного повітря на 2022-2026 роки» [3].

Програма передбачає два основні методи проведення моніторингу: довгострокові вимірювання та індикативні оцінки. Мережа моніторингу складається з двох стаціонарних постів, розміщених у різних частинах міста з низьким рівнем забруднення. Основними контролюваними речовинами є діоксид азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, а також тверді частинки (ТЧ10 і ТЧ2.5), що значно впливають на якість повітря і здоров'я населення.

Забруднення атмосферного повітря у Хмельницькому здебільшого викликано транспортом та промисловістю. Дані середньорічних концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі у 2023 році наведені на рисунку 1.



1 – аміак; 2 – діоксид азоту; 3 – діоксид сірки; 4 – оксид азоту; 5 – оксид вуглецю; 6 – пил; 7 – фенол; 8 – формальдегід; 9 – хлористий водень

Рисунок 1 – Вміст забруднюючих речовин в атмосферному повітрі в агломерації «Хмельницький» у 2023 році (частки ГДК)

Відповідно до рисунку 1 перевищень гранично-допустимих концентрацій (ГДК) по середньорічних концентраціях забруднюючих речовин не спостерігається. Водночас проведені нами визначення концентрацій твердих частинок на вулицях центральної частини міста з активним рухом

автотранспорту, де відсутні пости спостереження за станом атмосферного повітря, свідчать про перевищення ГДК. Це обумовлює необхідність оптимізації системи моніторингу в агломерації «Хмельницький».

Найбільш оптимальним варіантом є використання пересувного посту спостереження, що дозволяє проводити вимірювання в різних точках міста, включаючи зони з підвищеним рівнем забруднення, промислові райони, транспортні магістралі та житлові квартали. Їх мобільність забезпечує оперативне реагування на локальні джерела забруднення, надзвичайні ситуації або різкі зміни у складі атмосферного повітря. Крім того, пересувні пости сприяють оптимізації витрат на моніторинг, оскільки дозволяють охопити більшу територію без необхідності встановлення стаціонарних станцій у кожній зоні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Верховна Рада України. (1992). Закон України «Про охорону атмосферного повітря» [Електронний ресурс]. Офіційний текст (станом на 01 жовтня 2023 р.). Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
2. Кабінет Міністрів України. (2019). Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря [Електронний ресурс]. Офіційний сайт. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#n130>
3. Хмельницька міська рада. (2021). Про затвердження Програми державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря агломерації «Хмельницький» на 2022-2026 роки [Електронний ресурс]. Рішення позачергової шістнадцятої сесії Хмельницької міської ради від 28 квітня 2021 р. № 69/2022. Режим доступу: <https://www.khm.gov.ua/uk/content/pro-zatverdzhennya-programy-derzhavnogo-monitoryngu-u-galuzi-ohorony-atmosfernogo-povitrya-0>

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ОГІЄНКА

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ПОДІЛЬСЬКІ ЧИТАННЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ
БІОТИЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ,
ПРИРОДНИЧА ОСВІТА

ЗБІРНИК ЗА МАТЕРІАЛАМИ
ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
З МІЖНАРОДНОЮ УЧАСТЮ

КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ОГІЄНКА
ВУЛ. ОГІЄНКА, 61, М. КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКИЙ, 32300.
СВІДОЦТВО СЕРІЇ ДК № 3382 ВІД 05.02.2009 Р.

ВИГОТОВЛЕНО В КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКОМУ НАЦІОНАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ ІМЕНІ
ІВАНА ОГІЄНКА
ВУЛ. ОГІЄНКА, 61, М. КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКИЙ, 32300