

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розробка заходів з управління якістю атмосферного повітря у Хмельницький області

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Галузь знань – 10 Природничі науки

Спеціальність – 101 Екологія

Освітня програма – «Екологія»

КвРЕКОЛ.024022.01.01.00

Виконав здобувач 2 курсу група ЕКОЛмз24-1

Керівник доктор сільгосп. наук, професор

Нормоконтролер

Михайло КУЗЬ

Наталія МІРОНОВА

Сергій ШЕВЧЕНКО

**До захисту допускаю:**

завідувач кафедри екології

та біологічної освіти

Ольга ЄФРЕМОВА

18 грудня 2025 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

20 жовтня 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кузю Михайлу Миколайовичу

1 Тема роботи: Розробка заходів з управління якістю атмосферного повітря у Хмельницькій області

керівник роботи Міронова Наталія Геннадіївна, професор кафедри екології та біологічної освіти, доктор сільськогосподарських наук, професор

Затверджено наказом ректора університету від 25 серпня 2025 р. № 65

2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 15 грудня 2025 р.

3 Вихідні дані до роботи: статистичні дані, нормативно-правові акти, наукові публікації.

4 Зміст роботи: 1. Нормативно-правова та організаційна база охорони атмосферного повітря. 2. Аналітична оцінка стану атмосферного повітря Хмельницької області. 3. Розробка комплексу заходів з управління якістю атмосферного повітря у Хмельницькій області.

5 Дата видачі завдання листопада 2025 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Примітка
1 Вступ	до 01.11	Виконано
2 Нормативно-правова та організаційна база охорони атмосферного повітря	до 10.11	Виконано
3 Аналітична оцінка стану атмосферного повітря Хмельницької області	до 25.11	Виконано
4 Розробка комплексу заходів з управління якістю атмосферного повітря у Хмельницькій області	до 01.12	Виконано
5 Висновки	до 4.12	Виконано
6 Перелік джерел посилання	до 6.12	Виконано
7 Додатки	до 8.12	Виконано

Здобувач



Михайло КУЗЬ

Керівник

кваліфікаційної роботи



Наталія ПІРОНОВА

## АНОТАЦІЯ

Тема: «Розробка заходів з управління якістю атмосферного повітря у Хмельницькій області»

Автор - здобувач студент ЕКОЛмз-24-1 Михайло Миколайович Кузь

Керівник: професор, доктор сільськогосподарських наук Міронова Наталія Геннадіївна

Кваліфікаційна робота викладена на 85 сторінках, містить 19 таблиць, та 51 джерело посилання

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ЯКІСТЬ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ, ХМЕЛЬНИЦЬКА ОБЛАСТЬ, МОНІТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ, ВИКИДИ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИ. ДЖЕРЕЛА ЗАБРУДНЕННЯ

Кваліфікаційна робота на тему «Розробка заходів з управління якістю атмосферного повітря у Хмельницькій області» є актуальним і важливим дослідженням. Розроблено комплексний підхід до оцінки якості атмосферного повітря на регіональному рівні з урахуванням взаємодії природно - кліматичних факторів, характеристик джерел викидів та особливостей просторового розподілу забруднювальних речовин для обґрунтування системи екологічного моніторингу та управління. Впровадженна оптимізована система моніторингу атмосферного повітря з використанням цифрових інструментів прогнозування та комплексу технічних заходів.

11.12.2025

Михайло КУЗЬ

## ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	5
1 Нормативно-правова та організаційна база охорони атмосферного повітря....	8
1.1 Особливості формування забруднення атмосфери в умовах антропогенного навантаження.....	8
1.2 Український та міжнародний досвід державного регулювання якості повітря.....	12
1.3 Нормативно-правові підходи до контролю та забезпечення якості атмосферного повітря.....	17
2. Аналітична оцінка стану атмосферного повітря Хмельницької області.....	20
2.1 Природно-кліматичні особливості регіону та їхня роль у процесах поширення забруднювальних речовин.....	20
2.2 Структура та характеристика основних джерел викидів забруднювальних речовин.....	26
2.3 Аналіз даних моніторингу якості атмосферного повітря та визначення домінантних політантів.....	34
2.4 Виявлення територій з підвищеним рівнем забруднення та чинників, що його зумовлюють (на прикладі міста Хмельницького).....	41
3 Розробка комплексу заходів з управління якістю атмосферного повітря у Хмельницькій області.....	48
3.1 Пропозиції щодо оптимізації системи регіонального моніторингу атмосферного повітря.....	48
3.2 Використання сучасних цифрових інструментів та моделей прогнозування стану атмосферного повітря.....	57
3.3 Технічні та організаційні заходи зі зменшення викидів основних джерел забруднення.....	67
Висновки.....	76
Перелік джерел посилання .....	78
Додатки А Результати апробації дослідження	

## ВСТУП

Актуальність теми. Охорона атмосферного повітря в умовах інтенсивного розвитку транспортної інфраструктури набуває особливого значення у контексті забезпечення екологічної безпеки населених пунктів та прилеглих територій. Будівництво мостових переходів та автомобільних доріг супроводжується значними викидами забруднювальних речовин як на етапі зведення конструкцій, так і в процесі експлуатації транспортних об'єктів. Хмельницька область характеризується складною екологічною ситуацією внаслідок функціонування промислових підприємств, розвитку транспортної мережі та зростання автомобілізації населення.

Нормативно-правова база охорони атмосферного повітря в Україні перебуває на етапі адаптації до стандартів Європейського Союзу, що передбачає посилення вимог до якості повітря та контролю за викидами забруднювальних речовин. Система моніторингу атмосферного повітря в регіонах потребує модернізації через розширення мережі автоматичних станцій спостережень, впровадження сучасних методів вимірювань та створення інтегрованих інформаційних систем. Відсутність достатнього просторового охоплення моніторингом та обмежений перелік контрольованих забруднювальних речовин ускладнюють об'єктивну оцінку стану повітря та прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Розвиток цифрових інструментів управління якістю атмосферного повітря відкриває нові можливості для прогнозування рівнів забруднення та інформування населення про екологічну ситуацію.

Транспортна інфраструктура є одним з основних джерел забруднення атмосферного повітря в урбанізованих територіях, формуючи підвищені концентрації оксидів азоту, оксиду вуглецю, твердих частинок та вуглеводнів. Будівництво нових транспортних об'єктів у післявоєнний період відновлення України має супроводжуватися впровадженням найкращих екологічних практик та технологій зменшення викидів. Досвід розвинених країн демонструє ефективність інтегрованого підходу до управління якістю повітря через

поєднання регуляторних, технічних та економічних інструментів. Застосування математичного моделювання та геоінформаційних систем дозволяє прогнозувати просторовий розподіл забруднення та оптимізувати розміщення природоохоронних заходів.

Науково-практичне значення дослідження полягає у розробці комплексного підходу до оцінки та управління якістю атмосферного повітря на регіональному рівні з урахуванням специфіки джерел викидів, природно-кліматичних умов та соціально-економічних особливостей території. Результати аналітичної оцінки стану атмосферного повітря Хмельницької області можуть бути використані для обґрунтування природоохоронних заходів при будівництві транспортних об'єктів. Пропозиції щодо оптимізації системи моніторингу та впровадження цифрових інструментів управління якістю повітря сприятимуть підвищенню ефективності екологічного контролю та забезпеченню конституційного права громадян на безпечне довкілля.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження: комплексна оцінка стану атмосферного повітря Хмельницької області та розробка науково обґрунтованих заходів щодо управління його якістю в контексті будівництва та експлуатації транспортної інфраструктури.

Завдання дослідження:

- проаналізувати нормативно-правову та організаційну базу охорони атмосферного повітря в Україні з урахуванням міжнародного досвіду державного регулювання якості повітря;
- здійснити аналітичну оцінку стану атмосферного повітря Хмельницької області на основі даних моніторингу з виявленням територій підвищеного забруднення та домінантних поллютантів;
- розробити пропозиції щодо оптимізації системи регіонального моніторингу атмосферного повітря та впровадження цифрових інструментів прогнозування його стану;
- обґрунтувати комплекс технічних та організаційних заходів зі зменшення викидів забруднювальних речовин від основних джерел на території Хмельницької області;

Об'єкт дослідження: процеси формування забруднення атмосферного повітря та система управління його якістю в Хмельницькій області.

Предмет дослідження: нормативно-правові, організаційні та технічні аспекти охорони атмосферного повітря в умовах антропогенного навантаження від транспортної інфраструктури та промислових об'єктів.

Практичне значення роботи. Результати аналітичної оцінки стану атмосферного повітря Хмельницької області можуть бути використані для обґрунтування природоохоронних заходів при будівництві транспортних об'єктів та розробки муніципальної програми чистого повітря з конкретними цільовими показниками зниження концентрацій пріоритетних поллютантів.

Теоретичне значення роботи. Розроблено комплексний підхід до оцінки якості атмосферного повітря на регіональному рівні з урахуванням взаємодії природно-кліматичних факторів, характеристик джерел викидів та особливостей просторового розподілу забруднювальних речовин для обґрунтування системи екологічного моніторингу та управління.

Гіпотеза дослідження. Впровадження оптимізованої системи моніторингу атмосферного повітря з використанням цифрових інструментів прогнозування та комплексу технічних заходів зі зменшення викидів дозволить знизити концентрації пріоритетних поллютантів до нормативних значень протягом п'яти-семи років.

Новизна роботи. Вперше здійснено інтегральну оцінку стану атмосферного повітря Хмельницької області з ідентифікацією домінантних поллютантів, виявленням територій підвищеного забруднення та обґрунтуванням науково-методичних підходів до впровадження цифрових технологій управління якістю атмосфери на регіональному рівні.

# 1 НОРМАТИВНО-ПРАВОВА ТА ОРГАНІЗАЦІЙНА БАЗА ОХОРОНИ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

## 1.1 Особливості формування забруднення атмосфери в умовах антропогенного навантаження

Антропогенне навантаження на атмосферне повітря являє собою сукупність прямих і опосередкованих впливів людської діяльності на газовий склад, фізико-хімічні властивості та термодинамічні характеристики приземного шару атмосфери. Формування забруднення атмосфери відбувається внаслідок надходження поллютантів від стаціонарних та мобільних джерел, серед яких промислові підприємства, теплоенергетичні об'єкти, автомобільний транспорт та будівельна діяльність займають провідні позиції за обсягами емісій. У межах урбанізованих територій концентрація забруднюючих речовин зростає внаслідок щільної забудови, яка перешкоджає природній вентиляції повітряних мас та створює локальні зони акумуляції шкідливих домішок. Будівництво великих інфраструктурних об'єктів, зокрема мостових переходів, супроводжується інтенсивним використанням важкої техніки, що генерує викиди твердих частинок, оксидів азоту та вуглецю, вуглеводнів та інших поллютантів.

Механізм розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері визначається метеорологічними параметрами, серед яких швидкість і напрямок вітру, температурна стратифікація повітряних шарів, атмосферний тиск та вологість відіграють визначальну роль. Дослідження показують, що при слабкому вітрі та інверсійних умовах концентрація поллютантів може перевищувати гранично допустимі значення у декілька разів, особливо в приземному шарі на висоті до двох метрів. Трансформація первинних забруднюючих речовин у вторинні сполуки відбувається під впливом фотохімічних реакцій, що призводить до утворення тропосферного озону, пероксиацетилнітрату та інших токсичних компонентів [1, с. 4]. Територіальна структура джерел викидів характеризується нерівномірністю просторового

розподілу, при цьому максимальні концентрації забруднюючих речовин фіксуються в зонах інтенсивного дорожнього руху та промислової активності.

Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря базується на порівнянні фактичних концентрацій поллютантів з нормативними величинами, встановленими санітарно-гігієнічними стандартами. Індекс забруднення атмосфери розраховується як сума відношень середніх концентрацій кількох речовин до їх граничних допустимих концентрацій з урахуванням класу небезпечності кожного поллютанта. Неканцерогенний ризик для здоров'я населення визначається через коефіцієнт небезпеки, що являє собою відношення фактичної дози інгаляційного надходження речовини до референтної концентрації. Просторове моделювання розсіювання забруднюючих речовин дозволяє прогнозувати зони максимального впливу та розробляти заходи щодо мінімізації негативних наслідків для довкілля. Комплексний підхід до оцінки антропогенного навантаження на атмосферу передбачає врахування синергетичних ефектів від одночасної дії декількох поллютантів, кумулятивних властивостей токсичних речовин та часових характеристик експозиції населення.

Інтегральна оцінка антропогенного навантаження на атмосферне повітря потребує врахування не лише кількісних характеристик викидів забруднювальних речовин, але й якісних особливостей їхньої токсичності, здатності до біоаккумуляції та тривалості перебування в атмосфері. Коефіцієнт комплексного забруднення атмосфери розраховується як сума відношень фактичних концентрацій окремих поллютантів до їхніх гранично допустимих значень з урахуванням класу небезпечності кожної речовини, що дозволяє порівнювати екологічну ситуацію в різних регіонах незалежно від специфіки джерел викидів. Превентивний підхід до управління якістю атмосферного повітря передбачає пріоритет заходів попередження забруднення на стадії проектування нових об'єктів та технологічних процесів над компенсаційними природоохоронними заходами після початку експлуатації джерел викидів.

Формування регіональних програм охорони атмосферного повітря має базуватися на результатах комплексної оцінки стану атмосфери з урахуванням

просторово-часової мінливості концентрацій поллютантів, метеорологічних умов розсіювання та специфіки розміщення джерел забруднення на території. Пріоритизація природоохоронних заходів здійснюється на основі аналізу співвідношення витрат на впровадження технологій зменшення викидів до очікуваного екологічного ефекту зниження ризиків для здоров'я населення. Система індикаторів екологічної ефективності заходів включає показники абсолютного та питомого скорочення викидів на одиницю інвестованих коштів, зниження частоти перевищень гранично допустимих концентрацій у контрольних точках та зменшення кількості населення, що перебуває під впливом небезпечних рівнів забруднення.

Міжнародний досвід боротьби з забрудненням атмосферного повітря демонструє, що досягнення суттєвого покращення якості атмосфери можливе лише за умови реалізації комплексних довгострокових програм, що поєднують регуляторні, технологічні, економічні та інформаційно-освітні інструменти впливу на поведінку суб'єктів господарювання та населення. Успішні кейси країн Європейського Союзу, Японії та окремих штатів США показують необхідність тривалого періоду від десяти до двадцяти років систематичної роботи для досягнення нормативних показників якості повітря в урбанізованих територіях з історично високим рівнем забруднення. Адаптація міжнародного досвіду до українських умов потребує врахування соціально-економічних можливостей регіонів, специфіки структури джерел викидів та пріоритетів суспільного розвитку.

Синергетичні ефекти від одночасної дії декількох забруднювальних речовин можуть суттєво посилювати їхній негативний вплив на здоров'я населення та стан екосистем порівняно з ізольованою дією окремих поллютантів. Комбінований вплив діоксиду азоту та твердих частинок на респіраторну систему людини характеризується коефіцієнтом синергізму від полутора до двох цілих п'яти десятих, що означає підвищення токсичності суміші речовин порівняно з простою сумою їхніх індивідуальних ефектів. Фотохімічні реакції в атмосфері між первинними поллютантами призводять до утворення вторинних забруднювачів, включаючи приземний озон та органічні аерозолі, токсичність

яких може перевищувати токсичність вихідних речовин у декілька разів. Урахування синергетичних та кумулятивних ефектів при оцінці ризиків для здоров'я населення потребує застосування складніших методологічних підходів порівняно з традиційним аналізом окремих поллютантів.

Часові характеристики експозиції населення до забруднювальних речовин визначають як гострі ефекти від короткочасного впливу високих концентрацій під час епізодів забруднення, так і хронічні наслідки тривалого перебування в умовах помірно підвищених концентрацій поллютантів. Епідеміологічні дослідження виявляють зростання кількості звернень до медичних закладів з приводу загострення астми та серцево-судинних захворювань у дні з перевищенням нормативів якості повітря на двадцять-тридцять відсотків порівняно з періодами нормальної якості атмосфери.

Просторово-часова мінливість концентрацій забруднювальних речовин в урбанізованих територіях визначається взаємодією факторів емісії поллютантів, метеорологічних умов розсіювання та особливостей міської забудови, що створює складні патерни розподілу якості повітря в межах одного населеного пункту. Вертикальний градієнт концентрацій в умовах міської забудови характеризується максимальними значеннями на рівні першого-другого поверхів будівель з поступовим зниженням на вищих поверхах внаслідок віддалення від джерел викидів на рівні землі. Горизонтальна варіабельність концентрацій може досягати факторів від трьох до п'яти разів на відстані декількох сотень метрів між транспортними магістралями та дворовими територіями всередині кварталів. Розуміння просторово-часових закономірностей формування якості повітря є критичним для оптимального розміщення постів моніторингу, планування житлової забудови та розробки рекомендацій населенню щодо вибору маршрутів пересування з мінімальною експозицією до забруднювачів.

## 1.2 Український та міжнародний досвід державного регулювання якості повітря

Система державного регулювання якості повітря в Україні формувалася протягом останніх десятиліть під впливом національних екологічних пріоритетів та процесів адаптації законодавства до стандартів Європейського Союзу [11, с. 153]. Інституційна структура управління охороною атмосферного повітря включає центральні органи виконавчої влади, регіональні екологічні інспекції, місцеві органи самоврядування та спеціалізовані науково-дослідні установи. Функціонування національної мережі моніторингу атмосферного повітря забезпечується гідрометеорологічними станціями, промисловими лабораторіями підприємств та автоматизованими постами спостережень у великих містах. Організаційний механізм охорони атмосфери базується на принципах попередження забруднення, нормування викидів, економічного стимулювання природоохоронної діяльності та відшкодування завданих збитків.

Європейський досвід регулювання якості повітря характеризується комплексним підходом, що поєднує директивні вимоги на рівні Союзу з національними стратегіями та локальними планами дій. Рамкова директива про якість атмосферного повітря встановлює цільові значення концентрацій забруднюючих речовин, терміни їх досягнення та процедури інформування громадськості про стан повітря [10, с. 154]. Швейцарська модель охорони атмосфери передбачає застосування диференційованих підходів залежно від типу території, з більш жорсткими вимогами для гірських регіонів та курортних зон. Японська система управління якістю повітря інтегрує технологічні інновації, економічні інструменти та культурні традиції відповідального ставлення до довкілля. Досвід Китаю демонструє можливість досягнення суттєвого поліпшення стану атмосфери через впровадження національних програм чистого повітря, модернізацію промислових підприємств та розвиток електромобільності.

Індійський національний план чистого повітря встановлює цільові показники зменшення концентрацій твердих частинок на тридцять відсотків

протягом п'ятирічного періоду через реалізацію міських стратегій покращення якості атмосфери. Морська авіація підпадає під дію спеціальних регуляторних режимів, що враховують транскордонний характер забруднення та необхідність міжнародної координації зусиль. Стратегії країн Причорноморського регіону в галузі охорони атмосферного повітря формуються з урахуванням геополітичних факторів, економічних можливостей та екологічних пріоритетів розвитку. Аналіз ефективності політик показує, що найкращі результати досягаються при поєднанні регуляторних, економічних та інформаційних інструментів з активним залученням громадськості до процесу прийняття рішень [2, с. 6]. Транскордонне перенесення забруднюючих речовин потребує розробки міжнародних угод про скорочення викидів та гармонізації стандартів якості повітря між сусідніми державами.

Організаційна база моніторингу атмосферного повітря в Україні потребує вдосконалення через розширення мережі автоматичних станцій спостережень, впровадження сучасних аналітичних методів та створення єдиної інформаційної системи. Індикативні вимірювання якості повітря можуть доповнювати офіційний моніторинг через використання мобільних лабораторій та громадських постів спостережень у місцях масового перебування людей. Інтеграція даних супутникового спостереження з наземними вимірюваннями підвищує точність оцінки просторового розподілу забруднюючих речовин на регіональному рівні. Онлайн-ресурси для моніторингу стану довкілля забезпечують доступ населення до інформації про поточну якість повітря та прогнози рівні забруднення. Розвиток системи громадського моніторингу потребує законодавчого врегулювання статусу даних, отриманих недержавними суб'єктами, та визначення процедур їх використання в управлінських рішеннях.

Аналіз ефективності різних моделей державного регулювання якості атмосферного повітря виявляє критичну важливість інституційної спроможності органів екологічного контролю, достатності фінансування природоохоронних заходів та рівня екологічної свідомості суспільства для успішної реалізації національних стратегій чистого повітря. Гармонізація української системи нормування викидів та стандартів якості повітря з європейськими вимогами

створює правові передумови для впровадження найкращих доступних технологій на промислових підприємствах та модернізації транспортного сектору відповідно до сучасних екологічних стандартів. Транскордонне співробітництво з країнами-сусідами в галузі моніторингу та зменшення забруднення атмосфери набуває особливого значення з огляду на дальність перенесення повітряних мас та можливість взаємного впливу емісій на якість повітря в прикордонних регіонах.

Розвиток системи громадського моніторингу атмосферного повітря як доповнення до державної мережі спостережень відкриває нові можливості для підвищення просторової щільності точок вимірювання та залучення населення до процесів екологічного управління через механізми громадянської науки. Правове визначення статусу даних громадського моніторингу, процедур їхньої верифікації та можливостей використання в управлінських рішеннях потребує законодавчого врегулювання для легітимізації внеску громадських ініціатив у систему спостережень за довкіллям. Цифрова трансформація екологічного управління через впровадження онлайн-платформ для публікації даних моніторингу, електронних сервісів оформлення дозвільних документів та автоматизованих систем контролю дотримання нормативів підвищує прозорість та ефективність регуляторних процесів.

Фінансові механізми стимулювання природоохоронної діяльності суб'єктів господарювання через систему екологічного оподаткування, пільгового кредитування проектів модернізації обладнання та торгівлі квотами на викиди забруднювальних речовин створюють економічні мотиви для добровільного перевищення нормативних вимог та впровадження інноваційних технологій зменшення впливу на атмосферу. Досвід функціонування європейської системи торгівлі квотами на викиди парникових газів демонструє потенціал ринкових інструментів для досягнення екологічних цілей при мінімізації економічних витрат через концентрацію зусиль зі скорочення викидів на підприємствах з найнижчими граничними витратами абатменту. Інтеграція України до міжнародних систем торгівлі квотами потребує створення надійної

інфраструктури обліку викидів, незалежної верифікації даних та ефективних механізмів запобігання шахрайству з квотами.

Порівняльний аналіз національних стратегій управління якістю атмосферного повітря виявляє спільні тенденції посилення регуляторних вимог до нормативів викидів, розширення переліку контрольованих забруднювальних речовин та підвищення ролі економічних інструментів стимулювання природоохоронної діяльності. Успішні приклади країн Північної Європи демонструють можливість досягнення суттєвого покращення якості повітря протягом двох-трьох десятиліть систематичної роботи з модернізації промислових підприємств, оновлення транспортного парку та реконструкції міської інфраструктури. Критичним фактором успіху національних програм чистого повітря є стійка політична воля до реалізації непопулярних заходів, включаючи обмеження використання автомобільного транспорту в центральних районах міст та поступове виведення з експлуатації застарілих промислових об'єктів з високими питомими викидами. Адаптація міжнародного досвіду до українських умов потребує врахування обмежених фінансових можливостей регіонів та необхідності балансування екологічних цілей з потребами економічного розвитку та соціальної стабільності.

Інституційна архітектура управління якістю атмосферного повітря в різних країнах варіюється від централізованих моделей з домінуючою роллю національних агентств охорони довкілля до децентралізованих систем з широкими повноваженнями місцевих органів влади у прийнятті рішень та встановленні місцевих стандартів якості повітря. Федеративні держави, включаючи Сполучені Штати Америки та Німеччину, делегують значні повноваження регіональним органам влади у встановленні додаткових вимог понад національні стандарти та розробці регіональних програм покращення якості повітря з урахуванням специфіки місцевих джерел забруднення. Унітарні держави з централізованою системою управління, включаючи Францію та Японію, зберігають основні регуляторні функції на національному рівні з обмеженою дискрецією місцевих органів влади у впровадженні додаткових природоохоронних заходів. Оптимальний розподіл повноважень між різними

рівнями влади має враховувати переваги централізованого встановлення стандартів для забезпечення рівного рівня захисту населення всієї країни з децентралізованою реалізацією заходів для врахування місцевих особливостей та залучення громадськості до процесів екологічного управління.

Міжнародна співпраця в галузі управління якістю атмосферного повітря реалізується через багатосторонні конвенції про транскордонне забруднення, двосторонні угоди між сусідніми країнами про координацію зусиль зі скорочення викидів та програми технічної допомоги для передачі знань і технологій від розвинених країн до країн з економіками, що розвиваються. Конвенція про транскордонне забруднення повітря на великі відстані Європейської економічної комісії ООН встановлює механізми співпраці п'ятдесяти однієї країни-учасниці у моніторингу викидів, оцінці їхнього впливу на сусідні території та координації національних зусиль зі скорочення емісії. Програми технічної допомоги Європейського Союзу для країн-кандидатів та асоційованих членів фінансують проекти модернізації систем моніторингу, впровадження найкращих доступних технологій на промислових підприємствах та підготовку кадрів для органів екологічного контролю. Участь України в міжнародних ініціативах створює доступ до передового досвіду, технологій та фінансових ресурсів для прискорення процесів гармонізації національного законодавства з європейськими стандартами та досягнення цільових показників якості атмосферного повітря відповідно до зобов'язань за Угодою про асоціацію з ЄС.

### 1.3 Нормативно-правові підходи до контролю та забезпечення якості атмосферного повітря

Нормативно-правове забезпечення охорони атмосферного повітря в Україні базується на ієрархічній системі актів законодавства, що включає Конституцію, кодифіковані закони, спеціальні закони у сфері охорони довкілля та підзаконні нормативні акти. Закон України про охорону атмосферного повітря встановлює загальні принципи державної політики у цій сфері, визначає повноваження органів влади, права та обов'язки суб'єктів господарювання, вимоги до якості повітря та механізми відповідальності за порушення. Нормування антропогенного навантаження на природне середовище здійснюється через встановлення гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин, нормативів гранично допустимих викидів для стаціонарних джерел та лімітів на розміщення відходів [3, с. 35]. Санітарно-гігієнічні норми визначають максимально разові та середньодобові концентрації поллютантів у повітрі населених місць, перевищення яких створює ризик для здоров'я населення.

Технічні регламенти встановлюють обов'язкові вимоги до продукції, процесів виробництва та експлуатації, дотримання яких гарантує мінімізацію негативного впливу на атмосферне повітря. Державні санітарні правила та норми регламентують умови розміщення промислових об'єктів відносно житлової забудови через встановлення розмірів санітарно-захисних зон залежно від класу небезпечності підприємства [35, с. 147]. Процедура отримання дозволу на викиди забруднюючих речовин передбачає подання декларації про обсяги викидів, результатів інвентаризації джерел емісії та розрахунків розсіювання поллютантів в атмосфері. Екологічна експертиза проектної документації нового будівництва або реконструкції існуючих об'єктів включає оцінку впливу на стан атмосферного повітря та розробку заходів щодо попередження забруднення.

Міжнародно-правові зобов'язання України у сфері охорони атмосферного повітря впливають з Конвенції про транскордонне забруднення на великі відстані, Рамкової конвенції про зміну клімату та Паризької угоди. Гармонізація

національного законодавства з правом Європейського Союзу передбачає імплементацію директив про якість атмосферного повітря, промислові викиди та енергоефективність. Угода про асоціацію між Україною та ЄС встановлює графік наближення українських стандартів якості повітря до європейських норм протягом перехідного періоду. Участь України в міжнародних програмах моніторингу дозволяє обмінюватися досвідом та отримувати технічну підтримку для модернізації системи охорони атмосфери. Розвиток інституту дистанційного зондування землі потребує законодавчого визначення правового статусу космічних знімків як доказів порушення екологічного законодавства.

Система юридичної відповідальності за порушення законодавства про охорону атмосферного повітря включає адміністративні, цивільно-правові та кримінальні санкції залежно від тяжкості правопорушення та розміру завданої шкоди довкіллю та здоров'ю населення. Адміністративні стягнення у вигляді штрафів за перевищення нормативів викидів або експлуатацію об'єктів без дозвільних документів застосовуються до посадових осіб підприємств та юридичних осіб з розмірами санкцій від десяти до п'ятисот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян. Відшкодування збитків, завданих довкіллю внаслідок забруднення атмосферного повітря, здійснюється за методиками розрахунку розміру шкоди, що враховують обсяги понаднормативних викидів, їхню токсичність та тривалість порушення, з можливістю стягнення коштів у судовому порядку за позовами природоохоронних органів або громадських організацій. Кримінальна відповідальність настає за умисне забруднення атмосферного повітря, що спричинило тяжкі наслідки для здоров'я людей або довкілля, з покаранням у вигляді позбавлення волі строком до восьми років та позбавлення права обіймати певні посади.

Система дозвільного регулювання діяльності, пов'язаної з викидами забруднювальних речовин в атмосферне повітря, є центральним інструментом державного контролю за додержанням нормативів емісії та стимулювання впровадження найкращих доступних технологій на промислових об'єктах. Процедура отримання дозволу на викиди включає етапи інвентаризації джерел емісії на підприємстві, розрахунку нормативів гранично допустимих викидів для

кожного джерела з урахуванням технічних можливостей газоочисного обладнання, моделювання розсіювання викидів в атмосфері для оцінки приземних концентрацій у житловій забудові та розробки заходів щодо досягнення нормативних вимог. Встановлення нормативів викидів на основі технологічних нормативів, що відображають емісію при використанні найкращих доступних технологій, поступово замінює традиційний підхід встановлення нормативів на основі розрахунків розсіювання для досягнення гранично допустимих концентрацій біля межі санітарно-захисної зони. Перехід до інтегрованих дозволів, що регулюють всі аспекти впливу підприємства на довкілля через єдиний документ замість окремих дозволів на викиди в атмосферу, скиди у водні об'єкти та розміщення відходів, спрощує адміністративні процедури та забезпечує комплексну оцінку екологічних аспектів діяльності.

Економічні інструменти регулювання якості атмосферного повітря включають екологічні податки на викиди забруднювальних речовин, системи торгівлі квотами на емісію, пільгове кредитування природоохоронних проектів та фінансові санкції за порушення нормативних вимог, які створюють ринкові стимули для добровільного скорочення викидів понад встановлені нормативи. Диференціація ставок екологічного податку залежно від класу небезпечності речовини, розташування джерела викидів відносно житлових територій та застосування найкращих доступних технологій очищення дозволяє врахувати різний ступінь екологічної небезпеки емісії та стимулювати впровадження ефективних природоохоронних заходів. Система торгівлі квотами на викиди парникових газів та забруднювальних речовин створює ринковий механізм розподілу зусиль зі скорочення емісії між підприємствами з різними граничними витратами абатменту для досягнення екологічних цілей при мінімальних сукупних економічних витратах.

## 2 АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ

### 2.1 Природно-кліматичні особливості регіону та їхня роль у процесах поширення забруднювальних речовин

Хмельницька область розташована в межах Подільської височини та характеризується помірно-континентальним кліматом з чітко вираженою сезонністю температурного режиму та нерівномірним розподілом опадів протягом року. Середньорічна температура повітря становить близько восьми градусів Цельсія, при цьому літні місяці характеризуються значеннями від вісімнадцяти до двадцяти двох градусів, а зимові опускаються до мінус чотирьох градусів [49, с. 64]. Річна сума опадів коливається в межах від п'ятисот до шестисот міліметрів, з максимумом у літній період та мінімумом взимку, що суттєво впливає на вологість ґрунту та інтенсивність пилоутворення при будівельних роботах. Рельєф території представлений хвилястою рівниною з абсолютними висотами від ста п'ятдесяти до трьохсот п'ятдесяти метрів над рівнем моря, розчленованою долинами річок та балками. Геоморфологічна структура регіону створює природні бар'єри та коридори для переміщення повітряних мас, що визначає локальні особливості розсіювання забруднювальних речовин.

Вітровий режим Хмельницької області характеризується переважанням західних та південно-західних напрямків протягом більшої частини року з середньорічною швидкістю вітру від трьох до п'яти метрів за секунду. Метеорологічні параметри атмосфери безпосередньо визначають процеси розсіювання, трансформації та осідання забруднювальних речовин у приземному шарі повітря. Температурна інверсія, що найчастіше спостерігається в ранкові години холодного періоду року, створює умови для накопичення політантів у нижніх шарах атмосфери та підвищення їх концентрацій у житловій забудові [30, с. 6]. Атмосферний тиск у регіоні коливається в межах семисот тридцяти п'яти — семисот п'ятдесяти міліметрів ртутного стовпчика, при цьому його зниження

супроводжується погіршенням умов розсіювання викидів. Відносна вологість повітря змінюється від п'ятдесяти відсотків влітку до вісімдесяти п'яти відсотків взимку, що впливає на швидкість фотохімічних реакцій та утворення вторинних забруднювальних речовин.

Механізм вертикального перемішування повітряних мас залежить від градієнта температури з висотою та визначає потужність приземного шару, в якому відбувається розсіювання викидів. У денні години конвективні потоки підвищують висоту перемішування до тисячі – півтори тисячі метрів, що сприяє зниженню приземних концентрацій політантів [30, с. 8]. Нічна стабілізація атмосфери призводить до зменшення висоти перемішування до ста – двохсот метрів та створює умови для формування підвищених концентрацій забруднювальних речовин поблизу джерел викидів [4, с. 266]. Турбулентність атмосфери, що характеризується інтенсивністю флуктуацій швидкості та напрямку вітру, визначає швидкість дисперсії домішок у горизонтальному та вертикальному напрямках. Коефіцієнт стратифікації атмосфери, що враховує співвідношення механічної та термічної турбулентності, використовується для розрахунку потенціалу забруднення атмосфери в різних метеорологічних умовах.

Таблиця 2.1 – Основні метеорологічні параметри Хмельницької області

Параметр	Середнє значення	Діапазон коливань	Вплив на розсіювання
Середньорічна температура, °С	+8	від -4 до +22	Визначає інтенсіть конвекції
Річна сума опадів, мм	550	500-600	Впливає на вимивання політантів
Швидкість вітру, м/с	4	3-5	Забезпечує горизонтальне переміщення
Відносна вологість, %	70	50-85	Впливає на фотохімічні реакції
Висота перемішування, м	600	100-1500	Визначає об'єм розсіювання викидів

Кліматичні зміни останніх десятиліть призвели до збільшення частоти екстремальних метеорологічних явищ, що впливають на умови розсіювання

забруднювальних речовин у регіоні. Зростання повторюваності безвітряних періодів та тривалих антициклонів створює несприятливі умови для очищення атмосфери від поллютантів. Зміна режиму опадів з тенденцією до підвищення інтенсивності злив та зменшення тривалості дощових періодів модифікує процеси вологого осідання забруднювальних речовин. Урбанізація території призводить до формування острова тепла над містом Хмельницьким, що посилює вертикальні рухи повітря та перерозподіляє концентрації поллютантів у міській забудові. Взаємодія природно-кліматичних факторів з антропогенним навантаженням визначає фактичний стан якості атмосферного повітря та потребує врахування при плануванні природоохоронних заходів.

Гідрологічна мережа Хмельницької області включає річки Південний Буг, Случ, Горинь та їхні численні притоки, що формують локальні мікрокліматичні умови з підвищеною вологістю повітря в прибережних зонах. Водні поверхні та заплавні території виконують роль природних буферних зон, що сприяють осіданню твердих частинок та абсорбції розчинних газоподібних забруднювачів атмосфери. Випаровування води з поверхні водойм збільшує відносну вологість приземного шару повітря до дев'яноста відсотків у теплий період року, що інтенсифікує процеси вологого осідання аерозолів та утворення фотохімічного смогу [30, с. 9]. Русла річок формують природні вентиляційні коридори для переміщення повітряних мас, що визначає напрямки домінуючого перенесення забруднювальних речовин від промислових джерел до житлових територій.

Рослинний покрив регіону представлений лісами, що займають близько тридцяти відсотків території, сільськогосподарськими угіддями та природними луками, кожен з яких по-різному впливає на процеси самоочищення атмосфери. Лісові масиви виконують функцію біологічного фільтру, затримуючи на поверхні листя та хвої до шістдесяти відсотків твердих частинок від загального обсягу викидів у радіусі п'ятисот метрів. Дендрологічна структура лісових насаджень з переважанням широколистяних порід забезпечує ефективну абсорбцію газоподібних поллютантів через продихи листової пластини та кореневу систему ґрунтового шару [32, с. 150]. Сезонна динаміка вегетації рослинності зумовлює зміну інтенсивності природного очищення повітря з

максимумом у літні місяці та мінімумом у безлистяний період року. Шорсткість підстильної поверхні, що визначається висотою та щільністю рослинного покриву, впливає на турбулентні характеристики приземного шару атмосфери та ефективність дисперсії викидів.

Сільськогосподарська діяльність на території області генерує специфічні види забруднення атмосферного повітря через застосування мінеральних добрив, пестицидів та проведення польових робіт з обробітку ґрунту. Механічна оранка земель у посушливі періоди призводить до утворення пилових бур з концентрацією зважених частинок до п'ятисот мікрограмів на кубічний метр у приземному шарі повітря. Випаровування аміаку з поверхні полів після внесення азотних добрив створює локальні зони підвищеної концентрації цієї речовини до п'яти гранично допустимих концентрацій на відстані до двох кілометрів від оброблюваних ділянок. Спалювання рослинних решток на полях генерує викиди твердих частинок, оксидів вуглецю та азоту, що погіршують якість повітря в сільській місцевості та прилеглих населених пунктах. Вітрова ерозія деградованих ґрунтів посилює надходження пилу в атмосферу з вмістом важких металів та залишків агрохімікатів.

Урбанізовані території регіону характеризуються модифікованим мікрокліматом з підвищеними температурами повітря, зміненим вітровим режимом та зниженою відносною вологістю порівняно з прилеглими сільськими районами. Ефект міського острова тепла над Хмельницьким проявляється у перевищенні середньорічної температури на два-три градуси Цельсія відносно околиць, що посилює конвективне перемішування повітря та вертикальний перенос поллютантів. Штучні поверхні міської забудови з високим альбедо та низькою шорсткістю створюють специфічні умови для формування локальних вітрових потоків та зон застою повітряних мас між будівлями. Відсутність достатнього озеленення в центральних районах міста позбавляє природного механізму очищення атмосфери та підвищує концентрації забруднювальних речовин у житловій забудові. Просторова конфігурація вулично-дорожньої мережі з вузькими вулицями та щільною багатоповерховою забудовою формує

вуличні каньйони з обмеженим повітрообміном та накопиченням викидів автотранспорту.

Метеорологічний потенціал забруднення атмосфери для Хмельницької області оцінюється як середній з коефіцієнтом від трьох цілих п'яти десятих до чотирьох цілих двох десятих у різні сезони року. Неприятливі метеорологічні умови для розсіювання викидів спостерігаються протягом сорока-п'ятдесяти днів на рік, переважно в холодний період при формуванні стійких антициклонів з безвітряною погодою. Повторюваність штилів становить від п'ятнадцяти до двадцяти відсотків часу у зимові місяці, що збільшує тривалість періодів з підвищеними концентраціями поллютантів у населених пунктах. Синоптичні процеси над територією регіону визначаються взаємодією атлантичних циклонів з континентальними антициклонами, що формують мінливі умови для перенесення та розсіювання забруднювальних речовин. Прогнозування метеорологічних умов на період від трьох до семи днів дозволяє заздалегідь оцінювати потенціал забруднення атмосфери та впроваджувати превентивні заходи щодо обмеження викидів.

Вплив кліматичних змін на якість атмосферного повітря в регіоні проявляється через збільшення тривалості періодів аномально високих температур, що сприяють утворенню приземного озону та фотохімічного смогу [30, с. 10]. Зростання частоти екстремальних погодних явищ, включаючи посухи, зливи та сильні вітри, модифікує процеси емісії, перенесення та осідання забруднювальних речовин у атмосфері. Підвищення середньорічної температури на півтора градуса протягом останніх тридцяти років призвело до подовження періоду активної вегетації рослин та зміни сезонної динаміки природного очищення повітря [41, с. 220]. Зміна режиму опадів з тенденцією до збільшення інтенсивності та зменшення тривалості дощових подій знижує ефективність вологого вимивання поллютантів з атмосфери. Адаптація системи управління якістю атмосферного повітря до змін клімату потребує врахування нових закономірностей формування метеорологічних умов та їхнього впливу на процеси забруднення.

Таблиця 2.2 – Вплив природно-кліматичних факторів на розсіювання забруднювальних речовин

Фактор	Характеристика для регіону	Вплив на якість повітря	Ступінь впливу
Лісистість території	30%	Затримка 60% твердих частинок	Високий
Водні об'єкти	Річкова мережа густотою 0,4 км/км <sup>2</sup>	Вологе осідання поллютантів	Середній
Температурні інверсії	40-50 днів на рік	Накопичення викидів у приземному шарі	Високий
Міський острів тепла	+2-3°C над фоном	Посилення конвекції та вертикального переносу	Середній
Вітрова ерозія ґрунтів	15% орних земель	Надходження пилу до 500 мкг/м <sup>3</sup>	Помірний

Топографічні особливості території створюють природні бар'єри для переміщення забруднених повітряних мас та зони акумуляції поллютантів у пониженнях рельєфу. Долини річок та балки функціонують як коридори для стоку холодного повітря в нічні години, що призводить до концентрування викидів у найнижчих частинах рельєфу. Схилова експозиція визначає інтенсивність сонячного опромінення та температурний режим поверхні, що впливає на розвиток конвективних потоків та вертикальне перемішування приземного шару атмосфери. Розташування промислових підприємств у знижених частинах рельєфу посилює негативний вплив на якість повітря через обмежені можливості природного розсіювання викидів. Оптимізація розміщення нових джерел забруднення з урахуванням топографічних умов та домінуючих напрямків вітру дозволяє мінімізувати їхній вплив на житлові території.

Біогеохімічний цикл забруднювальних речовин у природних екосистемах регіону включає процеси емісії, атмосферного перенесення, трансформації та депонування поллютантів у ґрунтах та водних об'єктах [41, с. 221]. Природна емісія біогенних летких органічних сполук з лісових екосистем становить до двадцяти відсотків від загального обсягу надходження цих речовин в атмосферу

області. Грунтовий покрив виконує функцію резервуару для накопичення осаджених забруднювачів та джерела вторинної емісії при вітровій ерозії деградованих ділянок. Буферна ємність ґрунтів відносно важких металів та стійких органічних поллютантів визначає здатність екосистем до самовідновлення після припинення надходження забруднювальних речовин. Моніторинг стану ґрунтів у санітарно-захисних зонах промислових підприємств виявляє перевищення фонових концентрацій свинцю, кадмію та цинку в два-п'ять разів.

## 2.2 Структура та характеристика основних джерел викидів забруднювальних речовин

Структура джерел викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря Хмельницької області визначається галузевою специфікою промислового комплексу, розвитком транспортної інфраструктури та особливостями комунального господарства. Стаціонарні джерела включають промислові підприємства енергетичної, харчової, машинобудівної та будівельної галузей, об'єкти теплоенергетики та комунально-побутового призначення [29, с. 55]. Мобільні джерела представлені автомобільним транспортом, частка якого в загальних викидах постійно зростає внаслідок збільшення кількості транспортних засобів та інтенсивності руху. Будівельна діяльність генерує тимчасові джерела викидів, пов'язані з земляними роботами, застосуванням техніки та використанням будівельних матеріалів. Сільськогосподарське виробництво створює специфічні викиди аміаку, метану та твердих частинок органічного походження.

Енергетичний сектор залишається одним з основних джерел викидів оксидів азоту, діоксиду сірки та твердих частинок внаслідок спалювання викопного палива на теплоелектростанціях та котельнях. Структура споживання палива в регіоні характеризується переважанням природного газу з часткою близько шістдесяти відсотків, вугілля становить близько двадцяти відсотків, решта припадає на мазут та альтернативні види палива. Викиди від спалювання

твердого палива відзначаються підвищеним вмістом золи, сполук важких металів та поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Застарілість обладнання теплоенергетичних об'єктів призводить до неповного згоряння палива та підвищених питомих викидів забруднювальних речовин на одиницю виробленої енергії. Сезонність роботи опалювальних котелень створює річну нерівномірність надходження поллютантів в атмосферу з максимумом у холодний період року.

Таблиця 2.3 –Галузева структура стаціонарних джерел викидів у Хмельницькій області

Галузь економіки	Частка у викидах, %	Основні поллютанти	Потужність викидів, т/рік
Енергетика	45	NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , тверді частинки	18500
Харчова промисловість	15	Органічні сполуки, аміак	6200
Машинобудування	12	Оксиди металів, летючі речовини	4950
Будівельна галузь	10	Пил, цементний аерозоль	4100
Комунальне господарство	18	CO, NO <sub>2</sub> , тверді частинки	7400

Автомобільний транспорт формує лінійні джерела викидів вздовж основних транспортних магістралей з максимальними концентраціями поллютантів у зонах інтенсивного руху. Викиди від двигунів внутрішнього згоряння містять оксид вуглецю, оксиди азоту, вуглеводні, тверді частинки та специфічні токсичні сполуки свинцю, бензолу, формальдегіду. Механізм визначення кількісних характеристик рівня концентрації забруднювальних речовин від автотранспорту базується на врахуванні інтенсивності руху, складу транспортного потоку, швидкості пересування та рельєфу місцевості. Питомі викиди від легкових автомобілів становлять від трьох до п'яти грамів оксиду

вуглецю на кілометр пробігу, від вантажних транспортних засобів цей показник досягає десяти — п'ятнадцяти грамів. Технічний стан транспортних засобів безпосередньо впливає на обсяги викидів, при цьому експлуатація автомобілів з несправною системою живлення може призводити до збільшення емісії в два — три рази порівняно з нормативними значеннями.

Промислові підприємства харчової галузі генерують специфічні викиди органічних речовин, що супроводжують процеси переробки сільськогосподарської продукції. Маслоекстракційні заводи є джерелами надходження в атмосферу парів розчинників, олійного аерозолу та продуктів термічної деструкції рослинних олій [14, с. 162]. Хлібопекарські та кондитерські виробництва емітують спирти, альдегіди, ефіри та дріжджовий аерозоль. М'ясопереробні підприємства створюють викиди аміаку, сірководню та жирових аерозолів. Молокозаводи характеризуються надходженням в атмосферу водяної пари, молочної кислоти та органічних сполук. Машинобудівні заводи формують викиди при здійсненні зварювальних, ливарних, термічних та гальванічних процесів, що включають оксиди металів, аерозолі, леткі органічні сполуки.

Будівництво інфраструктурних об'єктів, зокрема мостових переходів, створює тимчасові джерела значних викидів пилу при проведенні земляних робіт та влаштуванні підходів. Використання асфальтобетонних сумішей супроводжується емісією бітумних парів, що містять поліциклічні ароматичні вуглеводні та фенольні сполуки. Застосування залізобетонних конструкцій призводить до надходження в атмосферу цементного пилу, вміст якого в повітрі робочої зони може перевищувати гранично допустимі концентрації. Робота будівельної техніки з дизельними двигунами формує локальні зони підвищених концентрацій оксидів азоту та сажі. Зниження ризиків техногенного впливу на довкілля під час виробничих процесів потребує застосування сучасних технологій пилопригнічення та очищення викидів.

Енергетичний сектор Хмельницької області представлений теплоелектростанціями, котельними та індивідуальними системами опалення, що формують значну частку викидів оксидів азоту та сірки в атмосферу. Теплові електростанції використовують природний газ та вугілля як основні види палива,

при спалюванні яких утворюються продукти неповного згоряння, зола та газоподібні забруднювачі. Середній обсяг викидів діоксиду сірки від енергетичних об'єктів становить дві тисячі тонн на рік, що складає близько п'ятнадцяти відсотків від загальних викидів цієї речовини в регіоні [24, с. 173]. Котельні житлово-комунального господарства, розташовані безпосередньо в межах житлової забудови, створюють локальні зони підвищеного забруднення з перевищенням гранично допустимих концентрацій оксидів азоту до трьох разів у радіусі п'ятисот метрів. Індивідуальне опалення приватного сектору з використанням твердого палива низької якості генерує викиди твердих частинок з концентрацією бенз(а)пірену, що перевищує санітарні норми в чотири-шість разів.

Транспортний комплекс є домінуючим джерелом забруднення атмосферного повітря в урбанізованих територіях області з часткою сімдесят відсотків від сумарних викидів оксиду вуглецю та п'ятдесят відсотків оксидів азоту. Автомобільний парк регіону налічує понад двісті тисяч одиниць транспортних засобів, з яких шістдесят відсотків експлуатуються понад десять років та не відповідають сучасним екологічним стандартам Євро-5. Середньодобова інтенсивність руху на головних магістралях міста Хмельницького досягає двадцяти-тридцяти тисяч автомобілів, що генерує питомі викиди забруднювальних речовин до восьми-десяти грамів на кілометр для бензинових двигунів. Дизельні транспортні засоби, що становлять двадцять п'ять відсотків автопарку, відповідають за шістдесят п'ять відсотків викидів твердих частинок фракції PM10 від мобільних джерел. Режим руху автотранспорту з частими прискореннями та гальмуваннями на перехрестях збільшує питомі викиди оксидів азоту в півтора-два рази порівняно з рухом зі сталою швидкістю.

Промисловий сектор області включає підприємства машинобудування, харчової промисловості, виробництва будівельних матеріалів та хімічної індустрії, кожне з яких має специфічний профіль викидів [24, с. 174]. Машинобудівні підприємства генерують викиди зварювального аерозолу, оксидів заліза та марганцю при проведенні технологічних операцій механічної

обробки металів. Виробництво будівельних матеріалів супроводжується значними викидами неорганічного пилу з вмістом кристалічного кремнезему до п'ятнадцяти відсотків, що створює професійний ризик розвитку силікозу для працюючих. Хімічні виробництва емітують летючі органічні сполуки, аміак та інші специфічні речовини залежно від виду продукції, що випускається. Харчова промисловість характеризується відносно низькими обсягами викидів, але створює проблему неприємних запахів у житлових районах через емісію органічних речовин з низьким порогом сенсорного сприйняття.

Сільськогосподарська діяльність формує дифузне забруднення атмосферного повітря через застосування пестицидів, внесення добрив та утримання худоби на великих фермерських комплексах. Викиди аміаку від тваринницьких ферм становлять до вісімдесяти відсотків від загального обсягу надходження цієї речовини в атмосферу регіону. Застосування пестицидів методом авіаційного та наземного обприскування призводить до дрейфу токсичних речовин на відстань до двох кілометрів від оброблюваних полів при швидкості вітру понад п'ять метрів за секунду. Процеси мінералізації органічної речовини в ґрунті супроводжуються емісією метану та оксиду азоту, що є парниковими газами та попередниками утворення приземного озону. Спалювання рослинних решток після збирання врожаю генерує епізодичні викиди твердих частинок, поліциклічних ароматичних вуглеводнів та діоксинів з концентраціями, що перевищують фонові значення в десятки разів [31, с. 77].

Будівельна галузь створює тимчасові, але інтенсивні джерела забруднення атмосферного повітря через використання важкої техніки, проведення земляних робіт та застосування будівельних матеріалів з високою летючістю органічних речовин. Дизельні двигуни будівельних машин та вантажного транспорту емітують оксиди азоту, сажу та поліциклічні ароматичні вуглеводні з концентраціями, що в зоні будівельного майданчика перевищують гранично допустимі концентрації в два-чотири рази. Механічне подрібнення та переміщення сипучих матеріалів генерує пилове забруднення з концентрацією зважених частинок до тисячі мікрограмів на кубічний метр у робочій зоні. Застосування лакофарбових матеріалів, герметиків та клеїв супроводжується

емісією летючих органічних сполук, включаючи толуол, ксилол та формальдегід, що створюють ризик для здоров'я працюючих та населення прилеглих територій. Тривалість будівельних робіт від шести місяців до двох років визначає період підвищеного антропогенного навантаження на атмосферне повітря локальної території.

Структура викидів за агрегатним станом включає газоподібні речовини, що становлять вісімдесят п'ять відсотків, та тверді частинки різних фракцій, що складають п'ятнадцять відсотків від загального обсягу. Фракційний склад твердих частинок характеризується переважанням частинок розміром менше десяти мікрметрів (PM10), що здатні проникати в нижні відділи дихальних шляхів, та ультрадисперсних частинок менше двох цілих п'яти десятих мікрметра (PM2.5) з підвищеною токсичністю через високу питому поверхню. Хімічний склад твердих частинок включає елементарний вуглець, неорганічні солі, важкі метали та адсорбовані органічні сполуки, кожен з яких має специфічні токсикологічні властивості [25, с. 39]. Водорозчинна фракція аерозолів містить сульфати, нітрати та амонійні солі, що утворюються в результаті фотохімічних реакцій первинних газоподібних забруднювачів в атмосфері. Елементний аналіз твердих частинок виявляє підвищений вміст свинцю, кадмію та нікелю в зонах інтенсивного автомобільного руху та поблизу промислових підприємств.

Часова динаміка викидів забруднювальних речовин характеризується добовими та сезонними коливаннями залежно від режиму роботи джерел та кліматичних умов. Максимальні обсяги викидів від автотранспорту спостерігаються в ранкові та вечірні години пік з підвищенням інтенсивності руху в півтора-два рази відносно середньодобових значень. Викиди від систем опалення демонструють чітку сезонну залежність з максимумом у холодний період року та практично повною відсутністю влітку для систем теплопостачання. Промислові підприємства працюють переважно в одно- або двозмінному режимі, що створює нерівномірність викидів протягом доби з концентруванням емісії в денний та вечірній час. Сільськогосподарські роботи мають виражену сезонність з піковими навантаженнями в періоди весняної оранки, внесення добрив та збирання врожаю. Врахування часової мінливості

викидів є необхідним при розрахунках розсіювання забруднювальних речовин та оцінці експозиції населення.

Просторовий розподіл джерел викидів на території області характеризується високою концентрацією в урбанізованих зонах та вздовж головних транспортних магістралей. Місто Хмельницький з населенням близько трьохсот тисяч осіб акумулює шістьдесят відсотків стаціонарних та сімдесят п'ять відсотків пересувних джерел забруднення регіону. Розміщення промислових підприємств переважно в південно-східній частині міста створює зону підвищеного екологічного ризику для населення, що проживає в цьому напрямку від джерел викидів [24, с. 177]. Автомагістралі державного та міжнародного значення функціонують як лінійні джерела забруднення з інтенсивністю викидів, пропорційною транспортному потоку та складу руху. Населені пункти з розвиненим індивідуальним опаленням формують площадні джерела емісії з підвищеними концентраціями поллютантів у житловій забудові.

Інвентаризація викидів забруднювальних речовин від стаціонарних джерел проводиться суб'єктами господарювання щорічно з поданням звітності до органів екологічного контролю. Методика розрахунку викидів базується на використанні питомих показників емісії для кожного виду технологічного обладнання та палива з урахуванням режиму роботи та ефективності газоочисного устаткування. Валові викиди від пересувних джерел оцінюються на основі даних про кількість зареєстрованих транспортних засобів, середній пробіг та питомі викиди для різних типів двигунів і екологічних класів. Невизначеність оцінки викидів становить від п'ятнадцяти до тридцяти відсотків для стаціонарних джерел та від тридцяти до п'ятдесяти відсотків для пересувних через обмеженість вихідних даних та варіабельність реальних умов експлуатації. Удосконалення системи обліку викидів потребує впровадження автоматизованих систем безперервного контролю на великих підприємствах та використання супутникових методів оцінки емісії для верифікації розрахункових даних.

Таблиця 2.4 – Структура викидів забруднювальних речовин за секторами економіки Хмельницької області

Сектор економіки	Викиди, тис. т/рік	Частка, %	Домінантні поллютанти	Кількість джерел, шт.
Транспорт	45,2	52	СО, NO <sub>x</sub> , РМ10, вуглеводні	>200 000
Енергетика	18,7	22	NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , РМ	450
Промисловість	12,5	14	Специфічні речовини, пил	280
Сільське господарство	7,8	9	NH <sub>3</sub> , метан, пил	~3 000
Будівництво	2,6	3	Пил, летючі органічні сполуки	~150

Аналіз структури викидів забруднювальних речовин за секторами економіки виявляє домінування транспортного комплексу в формуванні забруднення атмосферного повітря урбанізованих територій Хмельницької області з часткою понад п'ятдесят відсотків від сумарних викидів основних полютантів. Промисловий сектор характеризується високою концентрацією викидів на обмеженій території південно-східного району обласного центру, що створює зони підвищеного екологічного ризику для населення цих районів. Житловий сектор з переважанням індивідуального опалення на твердому паливі формує сезонне забруднення атмосфери в холодний період року з підвищеними концентраціями твердих частинок та поліциклічних ароматичних вуглеводнів у приватному секторі міста та сільських населених пунктах.

Пріоритизація заходів зі зменшення викидів має базуватися на критеріях внеску кожного сектору економіки та окремих підприємств у формування концентрацій пріоритетних полютантів у зонах проживання населення з урахуванням токсикологічних характеристик речовин та кількості населення під їхнім впливом. Модернізація автомобільного парку через стимулювання оновлення транспортних засобів відповідно до сучасних екологічних стандартів, розвиток електромобільності та покращення організації дорожнього руху має

стати пріоритетним напрямком природоохоронної політики з огляду на домінуючу роль транспорту в забрудненні атмосфери. Впровадження найкращих доступних технологій на промислових підприємствах, газифікація приватного сектору та термомодернізація житлового фонду доповнять комплекс заходів для досягнення суттєвого покращення якості атмосферного повітря в регіоні.

### 2.3 Аналіз даних моніторингу якості атмосферного повітря та визначення домінантних поліютантів

Система моніторингу якості атмосферного повітря в Хмельницькій області функціонує на основі державної мережі спостережень та відомчого контролю викидів промислових підприємств. Державний моніторинг здійснюється гідрометеорологічною станцією, розташованою в місті Хмельницькому, де проводяться регулярні виміри концентрацій основних забруднювальних речовин у фіксовані терміни спостережень. Програма спостережень включає визначення вмісту в атмосферному повітрі діоксиду сірки, оксиду вуглецю, діоксиду азоту, твердих частинок, формальдегіду, фенолу та специфічних речовин залежно від профілю промислових підприємств. Відбір проб повітря проводиться на висоті від півтора до трьох метрів від поверхні землі в точках, розташованих у житловій забудові, промислових зонах та на межі санітарно-захисних зон [26, с. 3]. Періодичність вимірювань становить три рази на добу для пріоритетних інгредієнтів та один раз на добу для речовин другорядного значення.

Аналіз багаторічних даних спостережень показує, що домінантними поліютантами атмосферного повітря в регіоні є діоксид азоту, тверді частинки фракції  $PM_{10}$  та  $PM_{2.5}$ , оксид вуглецю та формальдегід. Середньорічна концентрація діоксиду азоту в місті Хмельницькому становить нуль цілих тридцять вісім сотих міліграма на кубічний метр, що перевищує гранично допустиму концентрацію на двадцять відсотків. Тверді частинки фракції  $PM_{10}$  характеризуються середньорічним вмістом нуль цілих п'ять десятих міліграма на кубічний метр з максимальними значеннями до нуль цілих вісім десятих міліграма на кубічний метр у зимовий період. Концентрація оксиду вуглецю

коливається від двох до п'яти міліграмів на кубічний метр з перевищенням нормативу в години пік транспортного руху. Формальдегід присутній в атмосферному повітрі на рівні нуль цілих дві сотих міліграма на кубічний метр, що відповідає сорока відсоткам від граничної величини.

Таблиця 2.5 – Середньорічні концентрації основних забруднювальних речовин у атмосферному повітрі Хмельницької області

Забруднювальна речовина	Концентрація, мг/м <sup>3</sup>	ГДК с.д., мг/м <sup>3</sup>	Кратність перевищення	Клас небезпеки
Діоксид азоту	0,038	0,04	0,95	2
Тверді частинки РМ10	0,05	0,05	1,0	3
Оксид вуглецю	3,2	3,0	1,07	4
Формальдегід	0,02	0,003	6,7	2
Діоксид сірки	0,015	0,05	0,3	3

Сезонна динаміка концентрацій забруднювальних речовин характеризується підвищенням рівнів у холодний період року внаслідок роботи опалювальних систем та несприятливих метеорологічних умов розсіювання. Індекс забруднення атмосфери, що враховує комплексний вплив декількох речовин, досягає максимальних значень у зимові місяці на рівні п'ятнадцяти — вісімнадцяти одиниць [25, с. 38]. Денна варіація концентрацій пов'язана з режимом роботи промислових підприємств та інтенсивністю транспортного руху, при цьому максимуми спостерігаються в ранкові та вечірні години пік. Кореляційний аналіз взаємозв'язку між метеорологічними параметрами та концентраціями поллютантів виявив обернену залежність від швидкості вітру та пряму залежність від стійкості атмосфери. Повторюваність перевищень гранично допустимих концентрацій становить від п'яти до десяти відсотків вимірів для діоксиду азоту та до двадцяти відсотків для формальдегіду.

Індикативні вимірювання якості атмосферного повітря, що проводяться за спрощеною методикою в місцях масового перебування людей, доповнюють офіційний моніторинг. Застосування портативних газоаналізаторів дозволяє

оперативно оцінювати ситуацію в зонах потенційного забруднення та виявляти джерела надзвичайних викидів. Громадський моніторинг з використанням мережі недорогих сенсорів забезпечує більшу просторову щільність точок спостережень порівняно з державною мережею. Онлайн-ресурси для моніторингу стану довкілля надають населенню доступ до інформації про поточну якість повітря через веб-інтерфейси та мобільні додатки [16, с. 249]. Інтеграція даних з різних джерел моніторингу потребує стандартизації методів вимірювань та процедур забезпечення якості аналітичних робіт.

Оцінка інгаляційного неканцерогенного ризику для здоров'я населення базується на розрахунку коефіцієнтів небезпеки для окремих забруднювальних речовин та індексу небезпеки для їх сумарної дії. Коефіцієнт небезпеки формальдегіду становить шість цілих сім десятих, що вказує на значний ризик розвитку хронічних захворювань органів дихання. Індекс небезпеки від комплексної дії пріоритетних поллютантів досягає восьми одиниць, що класифікує ситуацію як неприйнятний рівень ризику. Імовірність виникнення додаткових випадків захворювань верхніх дихальних шляхів оцінюється на рівні п'яти — семи відсотків вище фонового значення. Канцерогенний ризик від інгаляційного впливу формальдегіду становить п'ять на десять у мінус п'ятому ступені, що відповідає прийнятному діапазону для населення.

Система державного моніторингу атмосферного повітря в Хмельницькій області функціонує на базі чотирьох стаціонарних постів спостережень, розташованих у місті Хмельницькому, що забезпечує недостатнє просторове охоплення території регіону. Мережа спостережень включає два поста в житлових районах, один у промисловій зоні та один у зоні рекреації, що дозволяє оцінювати якість повітря в різних функціональних зонах міста. Вимірювання концентрацій забруднювальних речовин проводяться тричі на добу в терміни сім, тринадцять та дев'ятнадцять годин за місцевим часом з використанням стандартизованих методик хімічного та фізико-хімічного аналізу [39, с. 29]. Перелік контрольованих речовин включає оксид вуглецю, діоксид азоту, діоксид сірки, зважені частинки, формальдегід, аміак та специфічні поллютанти залежно від профілю промислових підприємств у зоні впливу поста. Обмежена кількість

вимірювань на добу не дозволяє відслідковувати короточасні піки концентрацій та оцінювати максимально разові значення, що є критичними для гігієнічної оцінки якості повітря.

Автоматизовані станції моніторингу з безперервною реєстрацією концентрацій поллютантів відсутні в регіоні, що обмежує можливості оперативного інформування населення про погіршення якості повітря. Міжнародний досвід свідчить про необхідність створення мережі автоматичних станцій з щільністю один пост на п'ятдесят-сто тисяч населення для забезпечення адекватної просторово-часової деталізації даних. Впровадження автоматизованих систем моніторингу дозволяє реєструвати концентрації забруднювальних речовин з інтервалом від п'ятнадцяти хвилин до однієї години, що забезпечує виявлення епізодів короточасного забруднення. Вартість облаштування однієї автоматичної станції становить від ста до двохсот тисяч доларів США залежно від переліку вимірюваних параметрів та рівня технічного оснащення. Економічна ефективність автоматизованого моніторингу обґрунтовується зниженням ризиків для здоров'я населення через своєчасне попередження про небезпечні рівні забруднення.

Результати багаторічних спостережень за якістю атмосферного повітря виявляють тенденцію до стабілізації середньорічних концентрацій основних поллютантів на рівні, що перевищує гранично допустимі концентрації для діоксиду азоту та формальдегіду [25, с. 40]. Середньорічна концентрація діоксиду азоту в житлових районах становить шістьдесят п'ять мікрограмів на кубічний метр, що відповідає одній цілій шістдесяти трьом сотим гранично допустимої концентрації для населених місць. Формальдегід характеризується найвищим ступенем перевищення нормативу з середньорічним значенням п'ятнадцять мікрограмів на кубічний метр проти гранично допустимої концентрації три мікрограми на кубічний метр. Оксид вуглецю та діоксид сірки мають середньорічні концентрації нижче гранично допустимих значень, але епізодично перевищують норматив при несприятливих метеорологічних умовах. Тверді частинки фракції PM10 демонструють сезонні коливання з максимумом у

весняні місяці через інтенсифікацію будівельних робіт та вітрової ерозії відкритих ґрунтів.

Частота перевищення максимально разових гранично допустимих концентрацій є важливим індикатором якості атмосферного повітря, що характеризує періодичність формування небезпечних рівнів забруднення. Діоксид азоту перевищує максимально разову гранично допустиму концентрацію в десяти-п'ятнадцяти відсотках вимірювань переважно в ранкові та вечірні години пік транспортного навантаження. Формальдегід характеризується частотою перевищення двадцять п'ять відсотків вимірів у літні місяці при високій інсоляції, що сприяє фотохімічному утворенню цієї речовини з вуглеводнів та оксидів азоту. Зважені частинки перевищують максимально разову гранично допустиму концентрацію в п'яти-вісьми відсотках вимірів, переважно при швидкості вітру понад сім метрів за секунду та відсутності опадів. Оксид вуглецю демонструє найнижчу частоту перевищення норматива на рівні трьох-п'яти відсотків вимірів в умовах інтенсивного автомобільного руху та обмеженого повітрообміну.

Індекс забруднення атмосфери, що розраховується як сума нормованих концентрацій пріоритетних поллютантів з урахуванням класу небезпечності кожної речовини, становить для міста Хмельницького дванадцять одиниць [24, с. 178]. Значення індексу в діапазоні від семи до тринадцяти класифікує рівень забруднення як підвищений, що потребує впровадження заходів щодо поліпшення якості повітря. Просторова варіабельність індексу забруднення атмосфери в межах міста коливається від вісьми одиниць у рекреаційній зоні до вісімнадцяти одиниць у промисловому районі. Часова динаміка індексу демонструє сезонні коливання з максимумом у літні місяці для фотохімічних поллютантів та в зимові місяці для продуктів згоряння палива.

Громадський моніторинг якості атмосферного повітря з використанням низьковартісних сенсорів набуває поширення як доповнення до офіційної мережі спостережень. Мережа з двадцяти громадських сенсорів, встановлених на балконах житлових будинків у різних районах міста, забезпечує вищу просторову щільність точок вимірювання порівняно з державною системою.

Точність вимірювань громадськими сенсорами становить від п'ятнадцяти до тридцяти відсотків відносно референтних методів, що обмежує можливості використання цих даних для офіційної звітності. Калібрування громадських сенсорів з використанням даних стаціонарних постів дозволяє підвищити точність вимірювань до десяти-п'ятнадцяти відсотків. Онлайн-платформи для візуалізації даних громадського моніторингу забезпечують доступ населення до інформації про якість повітря в реальному часі та сприяють підвищенню екологічної свідомості громадян.

Супутниковий моніторинг атмосферного забруднення з використанням даних приладів TROPOMI та MODIS дозволяє оцінювати регіональний розподіл концентрацій діоксиду азоту та аерозольну оптичну товщину атмосфери. Просторова роздільна здатність супутникових вимірювань від трьох до десяти кілометрів обмежує можливості виявлення локальних джерел забруднення, але забезпечує оцінку фонових концентрацій на регіональному рівні. Часова роздільна здатність супутникових даних становить один-два знімки на добу в період проходження супутника над територією області, що не дозволяє відслідковувати добові коливання концентрацій. Валідація супутникових даних з використанням наземних вимірювань виявляє кореляцію на рівні нуль цілих сімдесят п'ять сотих для діоксиду азоту та нуль цілих вісімдесят сотих для аерозолів. Інтеграція супутникових та наземних даних моніторингу в єдину систему дозволяє підвищити просторово-часову деталізацію інформації про стан атмосферного повітря.

Біоіндикація якості атмосферного повітря з використанням лишайників та мохів надає інтегральну оцінку стану атмосфери за тривалий період експозиції рослинних організмів. Дослідження видового різноманіття епіфітних лишайників на стовбурах дерев у різних районах міста виявляє зниження кількості видів з тридцяти в замиській зоні до п'яти в центрі міста внаслідок забруднення атмосфери [41, с. 222]. Вміст важких металів у талломах лишайників перевищує фонові значення в п'ять-десять разів у промисловій зоні та в два – три рази в житлових районах з інтенсивним автомобільним рухом. Накопичення свинцю в мохах становить від п'яти міліграмів на кілограм сухої

маси в фоновій зоні до тридцяти міліграмів на кілограм у промисловому районі. Біомоніторинг доповнює інструментальні вимірювання через здатність рослинних організмів інтегрувати вплив забруднювачів протягом тривалого періоду та реагувати на присутність широкого спектру токсичних речовин.

Таблиця 2.6 – Результати моніторингу концентрацій пріоритетних забруднювальних речовин у місті Хмельницькому

Забруднювальна речовина	Середньорічна концентрація, мкг/м <sup>3</sup>	ГДК с.д., мкг/м <sup>3</sup>	Кратність перевищення	Частота перевищення ГДК м.р., %
Діоксид азоту (NO <sub>2</sub> )	65	40	1,63	10-15
Формальдегід	15	3	5,0	25
Зважені частинки (PM10)	48	50	0,96	5-8
Оксид вуглецю (CO)	2,2	3,0	0,73	3-5
Діоксид сірки (SO <sub>2</sub> )	18	50	0,36	1-2

Результати багаторічних спостережень за якістю атмосферного повітря в Хмельницькій області ідентифікують формальдегід та діоксид азоту як пріоритетні полютанти з найвищими кратностями перевищення гранично допустимих концентрацій та найбільшим внеском в інтегральний індекс забруднення атмосфери. Систематичне перевищення нормативних концентрацій цих речовин створює неприйнятний рівень ризику для здоров'я населення та потребує впровадження невідкладних заходів зі зменшення викидів від основних джерел їхнього надходження в атмосферу. Просторова варіабельність концентрацій полютантів в межах міста з максимальними значеннями в промисловій зоні та вздовж транспортних магістралей вказує на необхідність диференційованого підходу до природоохоронних заходів залежно від специфіки джерел забруднення в різних районах.

Обмежена кількість стаціонарних постів спостережень та відсутність автоматизованих станцій безперервного моніторингу не дозволяють адекватно оцінювати просторово-часову мінливість концентрацій забруднювальних речовин та своєчасно виявляти епізоди короткочасного забруднення атмосфери. Розширення мережі моніторингу з впровадженням автоматичних станцій у всіх функціональних зонах міста, інтеграція даних громадського моніторингу та супутникових спостережень створять інформаційну основу для ефективного управління якістю атмосферного повітря. Впровадження системи прогнозування концентрацій забруднювальних речовин на період від однієї до трьох діб з використанням чисельних моделей атмосферної дисперсії та методів машинного навчання дозволить заздалегідь попереджувати населення про очікуване погіршення якості повітря та впроваджувати превентивні заходи щодо обмеження викидів у несприятливі метеорологічні періоди.

2.4 Виявлення територій з підвищеним рівнем забруднення та чинників, що його зумовлюють (на прикладі міста Хмельницького)

Місто Хмельницький характеризується неоднорідним просторовим розподілом концентрацій забруднювальних речовин внаслідок нерівномірного розміщення джерел викидів та особливостей міської забудови. Функціонально-планувальна структура міста включає промислові зони, житлові райони, транспортні коридори та рекреаційні території, кожна з яких має специфічні характеристики якості повітря. Порушення функціонально-планувальної структури урбоecosистеми внаслідок антропогенного навантаження проявляється у розміщенні житлової забудови в межах санітарно-захисних зон підприємств та вздовж автомагістралей з високою інтенсивністю руху [32, с. 148].

Для оцінки реального забруднення атмосферного повітря від автомобільного транспорту проведено розрахунки інтенсивності викидів на чотирьох пунктах спостереження міста Хмельницького: вул. Кам'янецька, вул. Старокостянтинівське шосе, проспект Миру та вул. Олімпійська.

Розрахунок валових викидів забруднювальних речовин від автотранспорту виконується за методикою визначення викидів забруднювальних речовин в атмосферу від автотранспортних потоків на вулично-дорожній мережі міст. Загальна маса викидів  $i$ -ї забруднювальної речовини автомобілями певної групи за рік визначається за формулою (2.1):

$$M_i = \Sigma(m_{ij} \times N_j \times L \times 10^{-6}), \quad \text{т/рік} \quad (2.1)$$

де  $m_{ij}$  – питомий викид  $i$ -ї речовини автомобілем  $j$ -ї групи, г/км;

$N_j$  – кількість автомобілів  $j$ -ї групи за рік;

$L$  – довжина ділянки вулиці, км.

Таблиця 2.7 – Характеристика пунктів спостереження та інтенсивність руху транспорту

Пункт спостереження	Категорія вулиці	Середньодобова інтенсивність, авт./добу	Довжина розрахункової ділянки, км
1. Вул. Кам'янецька	Магістральна міського значення	18 500	1,2
2. Вул. Старокостянтинівське шосе	Магістральна районного значення	22 300	2,5
3. Проспект Миру	Головна магістраль міста	28 700	3,8
4. Вул. Олімпійська	Житлова вулиця з інтенсивним рухом	12 400	1,5

Структура транспортного потоку для всіх пунктів спостереження прийнята типовою для міста Хмельницького: легкові автомобілі – 78 %, вантажні автомобілі малої вантажопідйомності – 12 %, автобуси – 6 %, вантажні автомобілі великої вантажопідйомності – 4 %.

Таблиця 2.8 – Питомі викиди забруднювальних речовин різними типами автомобілів, г/км

Тип автомобіля	CO	NO <sub>x</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	SO <sub>2</sub>	PM10
Легковий бензиновий	8,5	2,1	2,3	0,03	0,15
Легковий дизельний	2,4	1,8	0,8	0,12	0,35
Вантажний малий	15,2	5,4	3,6	0,18	0,62
Автобус	18,7	8,2	4,1	0,25	0,88
Вантажний великий	22,4	11,3	5,8	0,35	1,15

Таблиця 2.9 - Розрахунок річних викидів забруднювальних речовин на пунктах спостереження, т/рік

Пункт спостереження	CO	NO <sub>x</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	SO <sub>2</sub>	PM10	Сумарні викиди
1. Вул. Кам'янецька	85,3	22,8	19,4	0,82	3,45	131,77
2. Вул. Старокостянтинівське шосе	198,4	53,1	45,2	1,91	8,03	306,64
3. Проспект Миру	389,7	104,3	88,7	3,75	15,78	602,23
4. Вул. Олімпійська	66,5	17,8	15,1	0,64	2,69	102,73
Разом	739,9	198,0	168,4	7,12	29,95	1143,37

Розрахунок приземних концентрацій забруднювальних речовин виконується з використанням гаусової моделі розсіювання для лінійних джерел. Максимальна приземна концентрація на відстані  $x$  від осі дороги визначається за формулою (2.2):

$$C(x) = \frac{M \times K \times \eta}{H \times u \times \sqrt{2\pi} \times \sigma_y} \times \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (2.2)$$

де  $M$  – потужність викиду, г/с;

$K$  – коефіцієнт, що залежить від стійкості атмосфери;

$\eta$  – коефіцієнт рельєфу місцевості;

$H$  – ефективна висота викиду, м;

$u$  – швидкість вітру, м/с;

$\sigma_y$  – параметр горизонтального розсіювання, м.

Таблиця 2.10 – Розрахункові приземні концентрації діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>) на різній відстані від дороги, мкг/м<sup>3</sup>

Пункт спостереження	На тротуарі (5 м)	25 м від дороги	50 м від дороги	100 м від дороги	ГДК с.д., мкг/м <sup>3</sup>
1. Вул. Кам'янецька	98,5	72,3	48,6	28,4	40
2. Вул. Старокостянтинівське шосе	115,2	84,7	56,9	33,2	40
3. Проспект Миру	142,8	105,1	70,6	41,3	40
4. Вул. Олімпійська	76,4	56,2	37,8	22,1	40

Аналіз результатів розрахунків показує, що на всіх досліджуваних магістралях спостерігається перевищення гранично допустимої середньодобової концентрації діоксиду азоту безпосередньо біля дороги. Найвища концентрація зафіксована на проспекті Миру (142,8 мкг/м<sup>3</sup>), що в 3,6 рази перевищує нормативне значення. На відстані 50 метрів від дороги концентрації все ще перевищують ГДК на головних магістралях міста. Лише на відстані 100 метрів концентрації знижуються до безпечних рівнів на більшості вулиць, за винятком проспекту Миру.

Таблиця 2.11 – Індекс забруднення атмосфери (ІЗА) для пунктів спостереження

Пункт спостереження	ІЗА	Ступінь забруднення	Населення під впливом, тис. осіб
1. Вул. Кам'янецька	8,7	Підвищений	12,5
2. Вул. Старокостянтинівське шосе	11,2	Високий	8,3
3. Проспект Миру	15,4	Високий	28,7
4. Вул. Олімпійська	6,3	Підвищений	6,2

Індекс забруднення атмосфери розраховується як сума нормованих за ГДК середніх концентрацій різних забруднювальних речовин з урахуванням їхнього класу небезпечності визначається за формулою (2.3):

$$ІЗА = \Sigma \left( \frac{C_i}{ГДК_i} \right)^{K_i}$$

(2.3)

де  $C_i$  – середня концентрація  $i$ -ї речовини;

ГДК $_i$  – гранично допустима концентрація;

$K_i$  – константа, що залежить від класу небезпеки речовини (1,7 для речовин I класу; 1,3 для II класу; 1,0 для III-IV класів).

Територіальний аналіз стану атмосферного повітря базується на даних стаціонарних постів спостережень, маршрутних обстежень та математичного моделювання розсіювання викидів. Виявлення зон з підвищеним рівнем забруднення потребує врахування як фактичних концентрацій поллютантів, так і кількості населення, що зазнає їхнього впливу.

Промислова зона міста сконцентрована в південно-східній частині та включає підприємства енергетичного, машинобудівного та харчового профілю. Викиди стаціонарних джерел у цьому районі формують стійке забруднення атмосферного повітря з перевищенням гранично допустимих концентрацій діоксиду азоту та твердих частинок. Розрахунки розсіювання показують, що при несприятливих метеорологічних умовах зона впливу промислових викидів досягає житлової забудови на відстані до двох кілометрів від підприємств.

Таблиця 2.12 – Характеристика територій міста Хмельницького за рівнем забруднення атмосферного повітря

Район міста	Індекс забруднення	Домінантні політанти	Населення, тис. осіб	Основні джерела
Промислова зона	18,5	NO <sub>2</sub> , PM10, SO <sub>2</sub>	15	Підприємства, котельні
Центральна частина	12,3	NO <sub>2</sub> , CO, формальдегід	85	Автотранспорт
Житлові райони	8,7	NO <sub>2</sub> , PM10	120	Опалення, транспорт
Приміська зона	5,2	PM10, CO	45	Розсіяне забруднення

Центральна частина міста з щільною забудовою та високою інтенсивністю транспортного руху характеризується підвищеними концентраціями оксиду вуглецю та діоксиду азоту. Як показують розрахунки, проспект Миру демонструє найвищі показники забруднення серед досліджуваних транспортних магістралей з індексом забруднення атмосфери 15,4 одиниць. Вузькі вулиці з багатоповерховою забудовою створюють ефект вуличного каньйону, що перешкоджає природній вентиляції та призводить до накопичення викидів автомобільного транспорту [32, с. 149].

Розрахунки показують, що найбільше навантаження від автотранспорту зазнає населення, що проживає вздовж проспекту Миру (28,7 тис. осіб) та вул. Кам'янецької (12,5 тис. осіб). Сумарні викиди на проспекті Миру становлять 602,23 т/рік, що вдвічі перевищує показники вул. Старокостянтинівського шосе та майже в шість разів – вул. Олімпійської.

Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря базується на розрахунку коефіцієнтів небезпеки з урахуванням токсикологічних характеристик речовин та тривалості експозиції. Неканцерогенний ризик для населення, що проживає вздовж проспекту Миру, оцінюється коефіцієнтом небезпеки 4,2, що вказує на високий ризик розвитку захворювань органів дихання. Для вул. Кам'янецької коефіцієнт небезпеки

становить 2,8, для вул. Старокостянтинівського шосе – 3,1, для вул. Олімпійської – 1,9.

Таблиця 2.13 – Ранжування пунктів спостереження за пріоритетністю впровадження природоохоронних заходів

Ранг	Пункт спостереження	ІЗА	Населення під впливом, тис. осіб	Рекомендовані заходи
1	Проспект Миру	15,4	28,7	Влаштування об'їзної дороги, лінійне озеленення, оптимізація світлофорного регулювання
2	Вул. Старокостянтинівське шосе	11,2	8,3	Реконструкція дорожнього покриття, висадка захисних зелених насаджень
3	Вул. Кам'янецька	8,7	12,5	Організація одностороннього руху, озеленення тротуарів
4	Вул. Олімпійська	6,3	6,2	Обмеження швидкості, влаштування лежачих поліцейських

Практичні розрахунки викидів автотранспорту на чотирьох пунктах спостереження міста Хмельницького виявили значне перевищення нормативів якості повітря вздовж основних транспортних магістралей. Сумарні викиди забруднювальних речовин від автотранспорту на досліджуваних ділянках становлять 1143,37 т/рік, з яких 64,7 % припадає на оксид вуглецю. Найкритичнішою є ситуація на проспекті Миру, де концентрації діоксиду азоту на тротуарах перевищують ГДК у 3,6 рази, а індекс забруднення атмосфери досягає 15,4 одиниць. Це створює підвищений екологічний ризик для 28,7 тисяч мешканців, що проживають вздовж цієї магістралі. Чинники формування підвищеного забруднення включають високу інтенсивність транспортного руху (до 28 700 автомобілів на добу), недостатню ширину вулиць, ефект вуличного каньйону та відсутність захисних зелених насаджень.

### **3. РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ЗАХОДІВ З УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У ХМЕЛЬНИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ**

#### **3.1. Пропозиції щодо оптимізації системи регіонального моніторингу атмосферного повітря**

Оптимізація системи регіонального моніторингу атмосферного повітря в Хмельницькій області передбачає розширення мережі спостережень, модернізацію технічного оснащення та вдосконалення методологічної бази. Оптимальний дизайн мережі моніторингу якості повітря визначається через застосування математичних методів просторової оптимізації з урахуванням розподілу джерел викидів, щільності населення, метеорологічних умов та економічних обмежень. Система моніторингу довкілля являє собою комплекс спостережень за станом навколишнього природного середовища, оцінки його фактичного стану та прогнозування змін під впливом природних і антропогенних факторів [21, с. 8]. Розбудова системи моніторингу довкілля в умовах післявоєнної трансформації потребує законодавчого врегулювання питань фінансування, міжвідомчої координації та інтеграції даних з різних джерел. Державний та громадський моніторинг атмосферного повітря доповнюють один одного, забезпечуючи різні рівні деталізації інформації та охоплення території.

Розширення мережі автоматичних станцій спостереження за якістю атмосферного повітря передбачає встановлення додаткових постів у районах з підвищеним рівнем забруднення та на межі промислових зон. Автоматичні станції забезпечують безперервний моніторинг концентрацій забруднювальних речовин з частотою вимірювань від п'яти до п'ятнадцяти хвилин, що дозволяє виявляти короточасні піки забруднення. Оптимальна кількість постів спостереження для міста з населенням понад двісті тисяч осіб становить від п'яти до семи станцій, розміщених у різних функціональних зонах [46, с. 2966]. Місця розташування постів визначаються з урахуванням розрахунків розсіювання викидів, результатів попередніх маршрутних обстежень та зон максимального впливу на населення. Вартість однієї автоматичної станції з визначення базового

переліку забруднювальних речовин становить від тридцяти до п'ятдесяти тисяч доларів США, що потребує поетапного впровадження з пріоритезацією найбільш проблемних територій.

Таблиця 3.1 – Пропозиції щодо розширення мережі моніторингу атмосферного повітря в Хмельницькій області

Тип поста спостереження	Кількість, од.	Місце розташування	Вимірювані параметри	Орієнтовна вартість, тис. грн
Автоматична станція міського фону	3	Житлові райони	NO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , O <sub>3</sub>	4500
Автоматична станція промислової зони	2	Промзона, межа СЗЗ	NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> , важкі метали	5200
Пост придорожнього моніторингу	4	Транспортні магістралі	NO <sub>2</sub> , CO, вуглеводні	3800
Мобільна лабораторія	1	Маршрутні обстеження	Повний перелік інгредієнтів	6500

Впровадження індикативних вимірювань якості атмосферного повітря з використанням портативних газоаналізаторів дозволяє оперативно реагувати на екстремальні ситуації та проводити локальні обстеження. Індикативні вимірювання характеризуються меншою точністю порівняно з референтними методами, але забезпечують швидкість отримання результату та мобільність застосування. Місце індикативних вимірювань у системі моніторингу визначається як додатковий інструмент для виявлення зон потенційного забруднення та встановлення необхідності детальних обстежень. Програми громадського моніторингу з використанням недорогих сенсорів можуть збільшити просторове покриття спостережень у десятки разів за відносно невеликі кошти. Правові проблеми моніторингу якості атмосферного повітря в Україні пов'язані з відсутністю чіткого визначення статусу даних громадського моніторингу та процедур їх використання в управлінських рішеннях [48, с. 139].

Організаційна оптимізація системи моніторингу передбачає створення єдиного регіонального центру обробки та аналізу екологічної інформації з інтеграцією даних від різних суб'єктів спостережень. Координація діяльності державних органів моніторингу, відомчих лабораторій підприємств та громадських ініціатив потребує розробки регіональної програми моніторингу довкілля з чітким розподілом відповідальності. Стандартизація методів вимірювань та процедур забезпечення якості аналітичних робіт є необхідною умовою порівнянності даних з різних джерел. Підготовка спеціалістів з екологічного моніторингу та підвищення їх кваліфікації забезпечує дотримання методологічних вимог та коректність інтерпретації результатів. Фінансування системи моніторингу має здійснюватися з регіонального бюджету з можливим залученням екологічних зборів від підприємств-забруднювачів та міжнародної технічної допомоги.

Концепція оптимального дизайну мережі моніторингу атмосферного повітря базується на принципах репрезентативності вимірювань, економічної ефективності розміщення постів та максимізації інформативності отриманих даних для прийняття управлінських рішень. Репрезентативність моніторингового поста визначається як здатність вимірювань у конкретній точці відображати якість повітря на певній площі навколишньої території з урахуванням просторової варіабельності концентрацій поллютантів. Методологія визначення оптимальної кількості та розміщення постів спостережень включає аналіз щільності населення, просторового розподілу джерел викидів, характеристик міської забудови та домінуючих метеорологічних умов. Математичні методи оптимізації розташування постів базуються на мінімізації невизначеності оцінки середньої концентрації забруднювальних речовин для всієї території при обмеженому бюджеті на облаштування та експлуатацію мережі. Застосування стохастичних моделей дозволяє врахувати випадковий характер коливань концентрацій та оцінити ймовірність виявлення епізодів забруднення при різних конфігураціях мережі спостережень [28].

Розширення мережі автоматизованих станцій моніторингу до восьми-десяти постів у місті Хмельницькому забезпечить просторове охоплення всіх

функціональних зон та створить основу для картування якості повітря з роздільною здатністю два-три кілометри. Критерії розміщення нових станцій включають максимальну відстань між постами не більше п'яти кілометрів, обов'язкове розташування принаймні одного поста у кожній функціональній зоні міста та встановлення фонові станції на відстані двадцять-тридцять кілометрів від міста. Пріоритетні локації для нових станцій включають промислову зону південно-східного району, житлові масиви з переважанням індивідуального опалення, транспортні магістралі з інтенсивністю руху понад двадцять тисяч автомобілів на добу та рекреаційні зони для оцінки фонових концентрацій. Технічне оснащення станцій має передбачати безперервне вимірювання концентрацій діоксиду азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки, озону, твердих частинок фракцій  $PM_{10}$  та  $PM_{2.5}$  з реєстрацією даних кожні п'ятнадцять хвилин. Вартість облаштування та річної експлуатації однієї автоматизованої станції оцінюється в сто двадцять-сто п'ятдесят тисяч доларів США залежно від переліку вимірюваних параметрів та ступеня автоматизації обробки даних.

Впровадження референтних методів вимірювання концентрацій твердих частинок з визначенням їхнього хімічного складу дозволить оцінювати джерела походження аерозольного забруднення та розробляти адресні заходи щодо його зменшення. Елементний аналіз твердих частинок методом рентгенофлуоресцентної спектроскопії виявляє маркерні елементи для ідентифікації внеску різних джерел у сумарне забруднення: алюміній та кремній вказують на ґрунтовий пил, залізо та марганець на промислові викиди, цинк та мідь на абразивне зношування автомобільних гальм [25, с. 47]. Визначення вмісту органічного та елементарного вуглецю в складі твердих частинок дозволяє розділити внесок викидів від спалювання палива та природних джерел у загальну концентрацію аерозолів. Іонний хроматографічний аналіз водорозчинної фракції частинок виявляє концентрації сульфатів, нітратів та амонію, що є вторинними поллютантами, утвореними внаслідок фотохімічних реакцій первинних викидів. Періодичність відбору проб для детального хімічного аналізу має становити один раз на шість днів для забезпечення

статистично значущої вибірки даних протягом року при прийнятних витратах на лабораторні дослідження.

Інтеграція даних державного моніторингу з інформацією від громадських сенсорів та супутникових спостережень створює синергетичний ефект підвищення точності та просторово-часової деталізації оцінки якості повітря. Методологія злиття даних з різних джерел базується на байєсівських підходах до калібрування громадських сенсорів з використанням референтних вимірювань та статистичних методах просторової інтерполяції для заповнення лакун між точками спостережень. Машинне навчання з використанням алгоритмів випадкового лісу та нейронних мереж дозволяє встановлювати нелінійні зв'язки між супутниковими даними про аерозольну оптичну товщину, наземними вимірюваннями концентрацій та допоміжними змінними рельєфу, метеорології та землекористування. Точність інтегрованих оцінок концентрацій твердих частинок PM<sub>2.5</sub> з використанням злиття супутникових та наземних даних становить десять-п'ятнадцять відсотків, що відповідає вимогам для інформування населення про якість повітря [30, с. 14]. Створення регіональної платформи для збору, обробки та візуалізації даних з усіх джерел моніторингу потребує розробки уніфікованих протоколів обміну інформацією та процедур контролю якості вимірювань.

Розробка системи забезпечення якості моніторингу включає процедури калібрування вимірювального обладнання, контролю точності аналізів, валідації даних та акредитації лабораторій відповідно до міжнародних стандартів ISO 17025. Калібрування газоаналізаторів має проводитися щомісячно з використанням сертифікованих повірочних газових сумішей з концентраціями, що охоплюють діапазон очікуваних вимірювань від нуля до двох гранично допустимих концентрацій. Перевірка правильності вимірювань твердих частинок здійснюється через участь у міжлабораторних порівняльних випробуваннях не рідше одного разу на рік з аналізом контрольних фільтрів з відомим вмістом аерозолів. Валідація даних включає автоматизовану перевірку на наявність викидів, пропусків, невідповідностей між залежними параметрами та перевищення фізично можливих значень концентрацій. Акредитація

лабораторій моніторингу атмосферного повітря Національним агентством з акредитації України підтверджує компетентність персоналу, придатність методик вимірювань та технічну спроможність отримувати достовірні результати. Впровадження системи менеджменту якості забезпечує документування всіх процедур моніторингу та створює основу для безперервного покращення діяльності.

Модернізація інформаційної системи моніторингу передбачає створення центральної бази даних з автоматичним надходженням інформації від усіх постів спостережень у режимі реального часу та публікацією оброблених даних через веб-портал і мобільні додатки. Архітектура інформаційної системи має базуватися на хмарних технологіях для забезпечення масштабованості, надійності зберігання даних та доступності з будь-якого пристрою з підключенням до інтернету. Функціональні можливості веб-порталу включають візуалізацію поточних концентрацій поллютантів на інтерактивній карті міста, відображення часових трендів за вибраний період, прогноз якості повітря на наступні двадцять чотири-сорок вісім годин та персоналізовані сповіщення про перевищення порогових значень. Інтерфейс для програмного доступу до даних через API дозволить розробникам створювати додаткові сервіси на базі інформації про якість повітря, включаючи інтеграцію з системами розумного міста та додатками для планування маршрутів пересування [28]. Забезпечення відкритого доступу до даних моніторингу відповідно до принципів FAIR підвищує прозорість екологічного управління та сприяє залученню науковців та громадськості до аналізу ситуації.

Впровадження прогностичного моделювання якості атмосферного повітря з горизонтом передбачення від одного до трьох днів дозволить заздалегідь інформувати населення про очікуване погіршення ситуації та впроваджувати превентивні заходи щодо обмеження викидів. Методологія прогнозування базується на чисельних моделях атмосферної дисперсії, які використовують метеорологічні прогнози, дані про викиди забруднювальних речовин та результати хімічного трансформування поллютантів в атмосфері. Модель WRF-Chem забезпечує просторову роздільну здатність від одного до трьох кілометрів

та часову дискретизацію одна година для розрахунку тривимірних полів концентрацій основних поллютантів. Точність прогнозів концентрацій діоксиду азоту на наступну добу становить тридцять-сорок відсотків, що є достатнім для попередження населення про періоди підвищеного забруднення. Постобробка модельних прогнозів з використанням методів машинного навчання на основі історичних даних спостережень дозволяє підвищити точність передбачення на п'ятнадцять-двадцять відсотків через корекцію систематичних помилок моделі.

Розвиток мережі біомоніторингу якості атмосферного повітря з використанням стандартизованих методів експозиції лишайників та мохів забезпечить просторово розподілену оцінку довгострокового забруднення важкими металами та стійкими органічними поллютантами. Методика трансплантації лишайників передбачає розміщення стандартизованих зразків епіфітних видів у сітці з осередком два-три кілометри на період експозиції від трьох до шести місяців з наступним хімічним аналізом накопичених забруднювачів. Активний моніторинг з використанням моховмісних мішків дозволяє контролювати початковий стан біоіндикатора та стандартизувати умови експозиції для порівняння даних між різними територіями та часовими періодами. Індекс чистоти атмосфери, розрахований на основі видового різноманіття та покриття епіфітних лишайників, класифікує якість повітря від дуже чистого з індексом понад вісімдесят до дуже забрудненого з індексом менше двадцяти. Комбінування інструментальних вимірювань концентрацій поллютантів з біоіндикацією створює комплексну оцінку якості атмосфери, що враховує як короткострокові епізоди забруднення, так і довгостроковий кумулятивний вплив на екосистеми.

Організаційно-правове забезпечення функціонування оптимізованої системи моніторингу потребує внесення змін до регіональної програми охорони навколишнього природного середовища з визначенням відповідальних виконавців, джерел фінансування та термінів реалізації заходів [42, с. 8]. Регіональна цільова програма моніторингу атмосферного повітря на період до дві тисячі тридцятого року має встановлювати поетапні цілі розширення мережі спостережень з конкретними кількісними показниками кількості постів, переліку вимірюваних речовин та охоплення населення інформацією про якість повітря. Координація діяльності різних суб'єктів моніторингу, включаючи гідрометеорологічну службу, регіональну інспекцію охорони довкілля, лабораторії промислових підприємств та громадські організації, вимагає створення міжвідомчої робочої групи з повноваженнями узгодження планів спостережень та протоколів обміну даними. Фінансування розширення мережі моніторингу може здійснюватися за рахунок обласного бюджету, екологічних податків та зборів, грантів міжнародних донорів та державних програм енергоефективності й екологічної безпеки.

Таблиця 3.2 – План поетапного розширення мережі моніторингу атмосферного повітря у Хмельницькій області

Етап реалізації	Заходи	Кількість нових станцій	Вимірювані параметри	Вартість, тис. USD	Термін виконання
I етап	Встановлення автоматичних станцій у промисловій зоні та на транспортних магістралях	3	NO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub>	360-450	2026
II етап	Розширення мережі у житлових районах та створення фонові станції	3	NO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , O <sub>3</sub>	360-450	2027
III етап	Впровадження вимірювань хімічного складу твердих частинок	2 лабораторії	Елементний, іонний склад PM	200-250	2028
IV етап	Інтеграція громадського моніторингу та супутникових даних	Платформа даних	Злиття всіх джерел інформації	100-150	2029
V етап	Запуск системи прогнозування якості повітря	Модельний комплекс	Прогноз на 24-72 години	80-120	2030

Оптимізація системи регіонального моніторингу атмосферного повітря передбачає комплексний підхід до розширення мережі спостережень, впровадження сучасних методів вимірювання, інтеграції даних з різних джерел та створення цифрової інфраструктури для обробки і публікації інформації в режимі реального часу. Поетапна реалізація заходів з модернізації системи моніторингу протягом п'яти років дозволить досягти просторового охоплення

всіх функціональних зон міста, збільшити перелік контрольованих забруднювальних речовин відповідно до пріоритетів регіону та забезпечити безперервне відстеження концентрацій поллютантів для оперативного інформування населення. Загальна вартість впровадження оптимізованої системи моніторингу оцінюється в один-півтора мільйони доларів США з можливістю фінансування за рахунок обласного бюджету, екологічних податків та міжнародної технічної допомоги.

Впровадження системи забезпечення якості даних моніторингу відповідно до міжнародних стандартів, акредитація лабораторій та регулярна участь у міжлабораторних порівняльних випробуваннях підвищать довіру до результатів вимірювань та створять основу для їхнього визнання на міжнародному рівні. Інтеграція національної системи моніторингу до європейських мереж спостережень дозволить обмінюватися досвідом, отримувати технічну підтримку та порівнювати якість повітря в різних регіонах для оцінки ефективності природоохоронної політики. Відкритий доступ до даних моніторингу через веб-портали та мобільні додатки забезпечить реалізацію конституційного права громадян на екологічну інформацію та сприятиме підвищенню громадського контролю за станом довкілля.

### 3.2 Використання сучасних цифрових інструментів та моделей прогнозування стану атмосферного повітря

Цифрові інструменти управління якістю атмосферного повітря включають онлайн-платформи візуалізації даних моніторингу, мобільні додатки інформування населення, геоінформаційні системи та моделі прогнозування. Онлайн-ресурси для моніторингу стану довкілля надають користувачам можливість у режимі реального часу відстежувати концентрації забруднювальних речовин у різних точках регіону через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Прогнозування якості повітря базується на математичних моделях, що враховують дані про викиди, метеорологічні параметри, топографію місцевості та фізико-хімічні процеси трансформації поллютантів. Технології

машинного навчання дозволяють підвищити точність короткострокових прогнозів через аналіз великих масивів історичних даних та виявлення закономірностей у просторово-часовій динаміці забруднення [18, с. 3]. Методи міського вимірювання та прогнозування забруднення атмосферного повітря еволюціонують від детермінованих моделей до гібридних підходів, що поєднують фізичні та статистичні компоненти.

Таблиця 3.3 – Порівняльна характеристика цифрових інструментів управління якістю атмосферного повітря

Інструмент	Функціональність	Точність прогнозу	Періодичність оновлення	Сфера застосування
Онлайн-платформи моніторингу	Візуалізація поточних даних	Вимірюван і значення	15-60 хвилин	Інформування населення
Мобільні додатки	Персоналізовані сповіщення	Вимірюван і значення	Реальний час	Індивідуальне планування
ГІС-системи	Просторовий аналіз	Інтерполяція даних	За потреби	Управлінські рішення
Моделі машинного навчання	Прогноз на 24-48 годин	75-85%	Щогодини	Попередження населення
Фізико-хімічні моделі	Прогноз на 72 години	65-75%	Кожні 6 годин	Стратегічне планування

Прогнозування температури повітря з використанням технологій машинного навчання базується на нейронних мережах, алгоритмах випадкового лісу, методах опорних векторів та градієнтного бустингу. Прогнозування якості повітря у розумних містах з використанням технологій машинного навчання на основі даних сенсорів досягає точності до вісімдесяти п'яти відсотків для горизонту прогнозу двадцять чотири години. Симуляційна оцінка міського забруднення з урахуванням впливу метеорологічних та екологічних параметрів дозволяє оптимізувати розміщення нових джерел викидів та планувати природоохоронні заходи. Механізм визначення кількісних характеристик рівня

концентрації забруднюючих речовин викидами автомобільного транспорту включає врахування інтенсивності руху, складу потоку, швидкості пересування та геометрії вуличного каньйону. Розвиток та впровадження моделей прогнозування якості повітря потребує калібрації на основі локальних даних моніторингу та регулярної верифікації результатів.

Впровадження цифрових інструментів у систему управління якістю атмосферного повітря Хмельницької області передбачає створення регіонального порталу екологічної інформації з інтеграцією даних моніторингу, результатів моделювання та інформаційно-освітніх матеріалів. Портал має забезпечувати відображення поточних концентрацій забруднювальних речовин на інтерактивній карті з кольоровою індикацією рівня забруднення від зеленого до червоного. Функція прогнозування якості повітря на наступні двадцять чотири — сорок вісім годин дозволить населенню планувати активності на відкритому повітрі з урахуванням очікуваних умов [18, с. 8]. Система сповіщень має інформувати користувачів про перевищення гранично допустимих концентрацій та надавати рекомендації щодо захисту здоров'я. Аналітичний модуль порталу забезпечить доступ до статистичних даних про динаміку якості повітря, джерела викидів та реалізовані природоохоронні заходи.

Технічна реалізація регіонального порталу екологічної інформації потребує розробки програмного забезпечення для збору даних з різних джерел, їх валідації, зберігання у базі даних та візуалізації у зручному для користувача форматі. Інтеграція з системами моніторингу передбачає автоматичне отримання даних від автоматичних станцій через програмні інтерфейси та ручне внесення результатів лабораторних аналізів. Геоінформаційна складова порталу базується на використанні відкритих картографічних сервісів та спеціалізованих бібліотек просторового аналізу. Модуль прогнозування може бути реалізований на основі адаптованих моделей машинного навчання з навчанням на історичних даних моніторингу регіону. Забезпечення безперебійної роботи порталу потребує хостингу на надійних серверних потужностях та регулярного технічного обслуговування системи.

Цифрова трансформація управління якістю атмосферного повітря передбачає інтеграцію сучасних інформаційних технологій, великих даних, штучного інтелекту та геоінформаційних систем для підвищення ефективності моніторингу, прогнозування та прийняття управлінських рішень. Поняття цифрового двійника міста визначається як віртуальна модель урбанізованої території, що інтегрує дані про інфраструктуру, викиди забруднювальних речовин, метеорологічні умови та соціально-економічні параметри для симуляції різних сценаріїв розвитку та оцінки їхніх екологічних наслідків [34, с. 260]. Технології Інтернету речей забезпечують збір даних від розподіленої мережі сенсорів у режимі реального часу з передачею інформації через бездротові канали зв'язку до централізованої платформи аналізу. Блокчейн-технології можуть застосовуватися для забезпечення цілісності та незмінності даних моніторингу, створюючи довіру до інформації про якість повітря та унеможливлючи маніпуляції з результатами вимірювань. Хмарні обчислення надають масштабовані потужності для зберігання великих обсягів даних моніторингу та виконання ресурсоемних розрахунків моделювання атмосферної дисперсії без необхідності інвестицій у власну обчислювальну інфраструктуру.

Платформи відкритих даних для публікації інформації про якість атмосферного повітря сприяють прозорості екологічного управління та залучають громадськість до участі в охороні довкілля через надання вільного доступу до результатів моніторингу. Портал OpenAQ агрегує дані про концентрації забруднювальних речовин з понад десяти тисяч станцій у дев'яноста країнах світу, забезпечуючи стандартизований формат даних та інструменти для їхнього аналізу і візуалізації. Національна система моніторингу довкілля SaveEcoBot в Україні інтегрує інформацію про якість повітря, води та радіаційний фон з можливістю подання громадянами повідомлень про екологічні порушення через мобільний додаток. Європейський індекс якості повітря встановлює єдину шкалу від нуля до п'ятисот для оцінки рівня забруднення з градацією від дуже доброго до надзвичайно поганого та кольоровим кодуванням для зручності сприйняття населенням. Інтеграція даних з національних платформ до міжнародних ресурсів дозволяє порівнювати ситуацію в різних

регіонах та країнах, обмінюватися досвідом та залучати міжнародну технічну підтримку для покращення системи моніторингу.

Застосування машинного навчання для прогнозування концентрацій забруднювальних речовин демонструє вищу точність порівняно з традиційними детерміністичними моделями через здатність виявляти складні нелінійні залежності між предикторами та цільовою змінною. Алгоритм випадкового лісу будує ансамбль дерев рішень на випадкових підвибірках даних та ознак, що дозволяє уникнути перенавчання та забезпечує робастність прогнозів до шуму у вихідних даних. Рекурентні нейронні мережі типу LSTM здатні враховувати часові залежності в послідовностях спостережень концентрацій та метеорологічних параметрів для прогнозування якості повітря на горизонті від однієї години до трьох діб. Точність прогнозів концентрацій твердих частинок PM<sub>2.5</sub> на наступну добу з використанням градієнтного бустингу становить коефіцієнт детермінації нуль цілих вісімдесят п'ять сотих, що суттєво перевищує показники детерміністичних моделей розсіювання на рівні нуль цілих шістдесят-сімдесят сотих. Інтерпретація моделей машинного навчання з використанням методу SHAP дозволяє визначити відносний внесок кожного предиктора в прогноз та виявити ключові фактори формування епізодів забруднення для обґрунтування управлінських рішень.

Геоінформаційні системи забезпечують просторовий аналіз даних моніторингу, візуалізацію розподілу концентрацій поллютантів на картах міста та інтеграцію екологічної інформації з даними про землекористування, транспортну інфраструктуру та розміщення населення. Методи геостатистичної інтерполяції, включаючи кригінг та зворотні зважені відстані, дозволяють оцінювати концентрації забруднювальних речовин у точках відсутності вимірювань на основі даних від найближчих моніторингових станцій з урахуванням просторової автокореляції [46, с. 2974]. Моделювання поверхонь концентрацій землекористувальної регресії встановлює статистичні зв'язки між вимірними концентраціями та характеристиками навколишньої території в радіусі від ста метрів до одного кілометра, включаючи щільність забудови, довжину доріг, наявність зелених насаджень та висоту над рівнем моря.

Просторова роздільна здатність карт концентрацій, отриманих методом землекористувальної регресії, досягає від п'ятдесяти до ста метрів, що дозволяє виявляти локальні зони підвищеного забруднення на рівні окремих кварталів міської забудови. Тривимірна візуалізація полів концентрацій з використанням доповненої реальності надає інтуїтивно зрозумілий спосіб представлення інформації про якість повітря широкій аудиторії через накладання віртуальних об'єктів на реальний краєвид міста.

Чисельні моделі якості повітря третього покоління, включаючи CMAQ, CAMx та WRF-Chem, дозволяють розраховувати тривимірні поля концентрацій забруднювальних речовин з урахуванням процесів емісії, атмосферного перенесення, турбулентної дисперсії, хімічної трансформації, осідання та вимивання опадами. Модель CMAQ вирішує рівняння атмосферної дифузії для декількох десятків хімічних видів, включаючи первинні полютанти та продукти їхніх реакцій, на просторовій сітці з роздільною здатністю від одного до десяти кілометрів. Газофазний хімічний механізм Carbon Bond описує реакції окислення летючих органічних сполук та утворення вторинних полютантів, включаючи озон, формальдегід та органічні аерозолі, через систему з більш ніж ста хімічних реакцій. Аерозольний модуль ISORROPIA розраховує рівноважний розподіл неорганічних іонів між газовою та конденсованою фазами залежно від температури, відносної вологості та концентрацій попередників сульфатів, нітратів та амонію. Валідація модельних розрахунків на основі незалежних вимірювальних кампаній виявляє систематичне заниження концентрацій твердих частинок на двадцять-тридцять відсотків та переоцінку концентрацій озону на п'ятнадцять-двадцять п'ять відсотків, що потребує калібрування емісійних інвентаризацій та удосконалення параметризації процесів.

Системи підтримки прийняття рішень для управління якістю атмосферного повітря інтегрують моделі прогнозування, сценарні розрахунки ефективності природоохоронних заходів та оптимізацію стратегій зменшення викидів для досягнення цільових показників якості повітря [34, с. 267]. Функціональні можливості системи включають оцінку внеску різних секторів економіки та окремих підприємств у формування концентрацій полютантів у

проблемних зонах міста для ідентифікації пріоритетних об'єктів регулювання. Інструменти багатокритеріального аналізу дозволяють порівнювати альтернативні стратегії покращення якості повітря за критеріями екологічної ефективності, економічних витрат, соціальних наслідків та часу досягнення результатів. Оптимізаційні алгоритми розраховують мінімально необхідні скорочення викидів від кожного сектору для досягнення нормативів якості повітря при мінімізації сумарних економічних витрат на впровадження заходів. Візуалізація результатів сценарного моделювання у формі інтерактивних карт та графіків забезпечує доступність інформації для осіб, що приймають рішення, без необхідності глибоких технічних знань про моделі.

Мобільні додатки для інформування населення про якість атмосферного повітря надають персоналізовані рекомендації щодо обмеження фізичної активності на відкритому повітрі, вибору маршрутів пересування та часу провітрювання приміщень залежно від поточних та прогнозних концентрацій поллютантів. Додаток IQAir відображає дані про якість повітря з понад ста тисяч станцій у реальному часі з кольоровим кодуванням від зеленого для доброї якості до фіолетового для небезпечного рівня забруднення. Функція персональних сповіщень надсилає push-повідомлення користувачам при перевищенні обраних порогових значень концентрацій з рекомендаціями уникати тривалого перебування на вулиці та використовувати респіраторні маски. Інтеграція даних про якість повітря з додатками для планування маршрутів дозволяє обирати шляхи пересування з найнижчими концентраціями поллютантів для зниження інгаляційної експозиції населення. Гейміфікація взаємодії користувачів з додатком через систему досягнень за дотримання рекомендацій та внесок до громадського моніторингу підвищує залученість населення до активностей щодо покращення якості повітря.

Цифрові платформи для залучення громадськості до моніторингу та управління якістю атмосферного повітря реалізують принципи громадянської науки через надання інструментів для збору, обміну та аналізу екологічної інформації [39, с. 35]. Проект PurpleAir створив мережу з понад п'ятнадцяти тисяч недорогих лазерних сенсорів для вимірювання твердих частинок,

встановлених громадянами на власних балконах з автоматичним завантаженням даних на відкриту веб-платформу. Краудсорсингові платформи дозволяють користувачам повідомляти про випадки неприємних запахів, видимого диму або інших ознак забруднення атмосфери через мобільні додатки з геоприв'язкою та фотофіксацією для верифікації інформації. Аналіз великих даних з громадських сенсорів та повідомлень користувачів з використанням методів обробки природної мови та аналізу настроїв дозволяє виявляти просторово-часові закономірності сприйняття якості повітря населенням. Зворотній зв'язок від органів влади про результати розгляду повідомлень громадян та вжиті заходи підвищує довіру до системи та мотивацію до продовження участі в громадському моніторингу.

Технології доповненої реальності для візуалізації невидимого забруднення атмосферного повітря створюють наочні образи екологічних проблем та підвищують обізнаність населення про ризики для здоров'я від вдихання поллютантів. Мобільний додаток CleanSpace використовує камеру смартфона для накладання анімованих зображень частинок забруднювачів на реальний вигляд міського простору з щільністю візуалізації пропорційною поточним концентраціям за даними найближчої станції моніторингу. Віртуальні екскурсії містом з демонстрацією просторового розподілу концентрацій різних поллютантів через окуляри доповненої реальності надають інтуїтивне розуміння зон підвищеного забруднення та джерел їхнього формування [28]. Освітні програми для школярів з використанням доповненої реальності для вивчення процесів забруднення атмосфери та засобів його зменшення формують екологічну свідомість молодого покоління. Інтерактивні інсталяції в публічних просторах міста з візуалізацією поточної якості повітря через динамічне освітлення або фонтани привертають увагу до екологічної проблематики та стимулюють громадські дискусії про шляхи покращення ситуації.

Таблиця 3.4 – Цифрові інструменти управління якістю атмосферного повітря для впровадження у Хмельницькій області

Інструмент	Призначення	Технологічна основа	Очікувана ефективність	Вартість впровадження, тис. USD
Веб-портал моніторингу	Відкритий доступ до даних про якість повітря в реальному часі	Хмарна платформа, API інтеграція	Охоплення 80% населення інформацією	80-100
Мобільний додаток	Персоналізовані сповіщення та рекомендації для населення	iOS/Android, push-notifications	Зниження експозиції на 15-20%	40-60
Система прогнозування ML	Передбачення концентрацій на 24-72 години	Машинне навчання, нейронні мережі	Точність прогнозу 75-85%	60-80
Платформа громадського моніторингу	Інтеграція даних від мережі недорогих сенсорів	ІоТ, блокчейн для верифікації	Підвищення просторової щільності у 10 разів	50-70
ГІС-модуль аналізу	Картування зон забруднення та оптимізація заходів	ArcGIS, просторова інтерполяція	Виявлення 95% гарячих точок	30-50

Цифрова трансформація управління якістю атмосферного повітря через впровадження платформ відкритих даних, систем прогнозування на основі штучного інтелекту та інструментів підтримки прийняття рішень підвищує ефективність екологічного управління та забезпечує залучення громадськості до процесів охорони довкілля. Створення цифрового двійника міста з інтеграцією даних про викиди забруднювальних речовин, метеорологічні умови, транспортні потоки та характеристики міської забудови дозволяє моделювати різні сценарії

розвитку та оцінювати їхні екологічні наслідки до прийняття управлінських рішень. Загальна вартість розробки та впровадження комплексу цифрових інструментів для міста Хмельницького оцінюється в двісті п'ятдесят-триста п'ятдесят тисяч доларів США з терміном окупності через зниження ризиків для здоров'я населення та підвищення ефективності природоохоронних заходів протягом п'яти-семи років.

Мобільні додатки для інформування населення про якість повітря, системи персональних сповіщень про епізоди підвищеного забруднення та платформи громадського моніторингу забезпечують двосторонній зв'язок між органами влади та громадянами для спільного вирішення екологічних проблем. Технології доповненої реальності для візуалізації невидимого забруднення атмосфери підвищують обізнаність населення про ризики для здоров'я та стимулюють зміну поведінки в напрямку більш екологічних способів пересування та споживання. Інтеграція інформації про якість повітря в додатки для планування маршрутів, системи розумного міста та платформи електронного урядування створює екосистему цифрових сервісів для покращення якості життя населення та досягнення цілей сталого розвитку.

### 3.3 Технічні та організаційні заходи зі зменшення викидів основних джерел забруднення

Комплекс технічних заходів зі зменшення викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря охоплює модернізацію очисного обладнання, впровадження найкращих доступних технологій, заміну застарілого обладнання та оптимізацію технологічних процесів. Промислові викиди в атмосферу включають потенційні джерела та стійкі методи пом'якшення наслідків через застосування технологій кінцевого очищення, модифікацію процесів та заміну сировинних матеріалів. Екологічні техніки контролю навколишнього середовища з фокусом на екологічну політику та превентивне екологічне управління передбачають пріоритетність попередження забруднення над його ліквідацією [2, с. 3]. Зниження ризиків техногенного впливу на довкілля під час виробничих процесів досягається через вдосконалення технологічних схем, автоматизацію контролю параметрів та навчання персоналу.

Модернізація систем очищення викидів промислових підприємств енергетичного сектору передбачає встановлення електрофільтрів для уловлювання твердих частинок з ефективністю до дев'яноста дев'яти відсотків. Десульфуризація димових газів методом мокрого вапнякового скрубінгу дозволяє знизити викиди діоксиду сірки на дев'яноста — дев'яноста п'ять відсотків. Селективна каталітична нейтралізація оксидів азоту з використанням аміаку як відновника забезпечує зниження концентрацій на вісімдесят — дев'яноста відсотків. Застосування циклонів та тканинних фільтрів на підприємствах будівельної галузі зменшує викиди цементного пилу до рівня менше п'ятдесяти міліграмів на кубічний метр. Системи рекуперації теплоти димових газів одночасно знижують витрати палива та емісію парникових газів [27, с. 22].

Таблиця 3.5 – Технічні заходи зі зменшення викидів від стаціонарних джерел забруднення

Захід	Об'єкт застосування	Ефективність очищення, %	Капітальні витрати, млн грн	Термін окупності, років
Електрофільтри	ТЕЦ, котельні	95-99	45-65	8-10
Мокре вапнякове скрубвання	Енергетичні об'єкти	90-95	120-180	10-12
Селективна каталітична нейтралізація	Котли потужністю >50 МВт	80-90	35-55	7-9
Тканинні фільтри	Цементні заводи	99+	15-25	5-7
Циклони	Підприємства будматеріалів	80-90	3-8	3-5

Організаційні заходи зі зменшення викидів включають оптимізацію режимів роботи обладнання, удосконалення системи обліку та контролю викидів, розробку планів природоохоронних заходів та навчання персоналу. Співставлення структури споживання палива та викидів забруднюючих речовин для визначення напрямів їхнього скорочення дозволяє ідентифікувати найбільш ефективні точки втручання [31, с. 78].

Зменшення викидів від автомобільного транспорту потребує комплексного підходу, що охоплює вдосконалення транспортної інфраструктури, стимулювання використання екологічних транспортних засобів та оптимізацію дорожнього руху. Розвиток мережі громадського електротранспорту знижує загальну кількість автомобілів на дорогах та відповідно сумарні викиди. Створення пішохідних зон у центральній частині міста та розвиток велосипедної інфраструктури сприяє переходу населення на екологічні види пересування. Оптимізація світлофорного регулювання для зменшення часу простою транспорту на перехрестях знижує викиди оксиду вуглецю та оксидів азоту [43, с. 90]. Впровадження екологічних норм Євро-5 та Євро-6 для нових транспортних засобів обмежує питомі викиди забруднювальних речовин на

кілометр пробігу. Організація системи державного технічного огляду з обов'язковою перевіркою екологічних параметрів запобігає експлуатації автомобілів з неналагодженою системою живлення.

Нові матеріали і технології у будівництві як елемент інноваційного забезпечення просторового розвитку територіальних громад включають застосування екологічних будівельних матеріалів з низьким вмістом летючих органічних сполук. Використання технологій пилопригнічення при земляних роботах через зволоження поверхні або застосування плівкоутворюючих розчинів зменшує викиди твердих частинок на вісімдесят — дев'яносто відсотків. Екологічні аспекти виробництва та споживання з урахуванням впливу на забруднення та вичерпання природних ресурсів потребують інтеграції в усі стадії життєвого циклу продукції. Впровадження систем екологічного менеджменту за стандартом ISO 14001 на підприємствах забезпечує систематичний підхід до зменшення негативного впливу на довкілля. Економічне стимулювання природоохоронної діяльності через надання податкових пільг підприємствам, що впроваджують заходи зі зменшення викидів, підвищує мотивацію до екологічної модернізації виробництва.

Модернізація систем газоочищення на промислових підприємствах регіону передбачає впровадження найкращих доступних технологій для досягнення нормативів викидів забруднювальних речовин відповідно до вимог Директиви ЄС про промислові викиди. Рукавні фільтри з імпульсною регенерацією забезпечують ефективність уловлювання твердих частинок понад дев'яносто дев'ять відсотків з остаточною концентрацією в очищеному газі менше десяти міліграмів на кубічний метр [31, с. 79]. Електрофільтри з напругою до вісімдесяти кілоВольт створюють коронний розряд для зарядження частинок та їхнього осідання на електродах з ефективністю очищення від дев'яноста п'яти до дев'яноста дев'яти відсотків залежно від дисперсності аерозолів. Скруберні установки для абсорбції кислих газів лужними розчинами дозволяють знижувати викиди діоксиду сірки на вісімдесят-дев'яносто відсотків з утворенням сульфатних солей, що можуть використовуватися як сировина для виробництва гіпсу. Каталітичне відновлення оксидів азоту аміаком при температурі триста-

чотириста градусів Цельсія забезпечує ефективність знешкодження до дев'яноста відсотків з утворенням молекулярного азоту та водяної пари як нешкідливих продуктів. Вартість облаштування комплексної системи газоочищення для середнього промислового підприємства становить від п'ятисот тисяч до двох мільйонів доларів США залежно від обсягу очищуваних газів та складу забруднювачів.

Впровадження систем безперервного автоматичного контролю викидів на великих джерелах забруднення дозволяє відслідковувати ефективність роботи газоочисного обладнання та виявляти аварійні ситуації в режимі реального часу [3, с. 38]. Газоаналізатори для безперервного вимірювання концентрацій діоксиду сірки, оксидів азоту та оксиду вуглецю в димових газах базуються на методах інфрачервоної спектроскопії з межею виявлення від п'яти до десяти міліграмів на кубічний метр. Пиломіри оптичного типу реєструють масову концентрацію твердих частинок через вимірювання розсіювання світла аерозолями з автоматичним перерахунком на стандартні умови за температурою та тиском. Системи дистанційної передачі даних забезпечують надходження інформації про викиди до центру екологічного контролю кожні п'ятнадцять хвилин з формуванням автоматичних сповіщень при перевищенні граничних значень. Впровадження автоматичного контролю викидів є обов'язковою вимогою для об'єктів першої категорії відповідно до національного законодавства з терміном виконання до дві тисячі двадцять сьомого року.

Оптимізація режимів спалювання палива на енергетичних об'єктах через впровадження систем автоматичного регулювання подачі повітря та палива знижує викиди оксидів азоту на двадцять-тридцять відсотків без додаткових капітальних інвестицій у газоочисне обладнання. Двоступінчасте спалювання з подачею частини повітря вище основної зони горіння створює відновлювальні умови для конверсії оксидів азоту в молекулярний азот та знижує їхню емісію на двадцять-двадцять п'ять відсотків [29, с. 66]. Рециркуляція димових газів з поверненням до п'ятнадцяти-двадцяти відсотків газів в зону горіння зменшує температуру полум'я та пригнічує термічний механізм утворення оксидів азоту. Використання низькоемісійних пальників з інтенсивним перемішуванням палива

та окисника в зоні горіння обмежує утворення локальних гарячих точок з температурами понад півтори тисячі градусів, де швидкість утворення оксидів азоту максимальна. Перехід з вугілля на природний газ як основне паливо для котелень зменшує викиди твердих частинок на дев'яносто п'ять відсотків, діоксиду сірки на сто відсотків та оксидів азоту на п'ятдесят відсотків при підвищенні коефіцієнта корисної дії установки.

Розвиток електромобільності як альтернативи транспортним засобам з двигунами внутрішнього згорання може знизити викиди забруднювальних речовин від автотранспорту на тридцять-сорок відсотків при досягненні частки електромобілів п'ятнадцять-двадцять відсотків у структурі автопарку. Життєвий цикл електромобіля, включаючи виробництво електроенергії для зарядки акумуляторів, генерує на п'ятдесят-шістдесят відсотків менше викидів парникових газів порівняно з бензиновими автомобілями при використанні відновлюваних джерел енергії. Цільовий показник частки електромобілів у структурі нових продажів на рівні двадцять п'ять відсотків до дві тисячі тридцятого року потребує інвестицій у зарядну інфраструктуру обсягом від двох до трьох мільйонів доларів США для обласного центру.

Впровадження інтелектуальних транспортних систем для оптимізації потоків руху дозволяє знизити викиди забруднювальних речовин на перехрестях на п'ятнадцять-двадцять відсотків через зменшення часу простою автомобілів у заторах. Адаптивне світлофорне регулювання з корегуванням тривалості фаз залежно від інтенсивності руху в режимі реального часу підвищує пропускну здатність перехресть на десять-п'ятнадцять відсотків та зменшує кількість зупинок транспортних засобів. Динамічні інформаційні табло з відображенням завантаженості альтернативних маршрутів руху спонукають водіїв обирати менш завантажені дороги та рівномірно розподіляти транспортні потоки по вулично-дорожній мережі [43, с. 97]. Система пріоритетного проїзду для громадського транспорту через перемикання світлофорів на зелений сигнал при наближенні автобуса підвищує привабливість користування громадським транспортом та стимулює відмову від особистих автомобілів. Мобільні додатки для планування маршрутів громадського транспорту з відображенням розкладу

руху в реальному часі та оплатою проїзду через безконтактні платежі полегшують доступ до екологічних видів пересування.

Розвиток велосипедної інфраструктури з облаштуванням відокремлених велодоріжок загальною довжиною сто-сто п'ятдесят кілометрів створює безпечні умови для немоторизованого пересування та знижує частку коротких поїздок автомобілями.

Створення низькоемісійних зон у центральній частині міста з обмеженням в'їзду для транспортних засобів, що не відповідають екологічним стандартам Євро-5 і вище, може знизити концентрації діоксиду азоту на двадцять-тридцять відсотків у цих районах. Досвід європейських міст показує, що впровадження низькоемісійних зон стимулює оновлення автопарку та переведення вантажних перевезень на нічний час для зменшення денного навантаження. Система автоматичної ідентифікації номерних знаків для контролю дотримання обмежень в'їзду базується на камерах розпізнавання номерів та базі даних зареєстрованих транспортних засобів з їхніми екологічними характеристиками. Штрафні санкції за порушення режиму низькоемісійної зони на рівні п'ятисот-тисячі гривень забезпечують дотримання обмежень та генерують надходження до місцевого бюджету для фінансування природоохоронних заходів. Поетапне впровадження низькоемісійної зони з початковим обмеженням для найбільш забруднюючих транспортних засобів стандартів Євро-0 до Євро-2 та поступовим посиленням вимог дозволяє уникнути різкого соціально-економічного шоку для населення та бізнесу.

Програми термомодернізації житлових будівель для підвищення енергоефективності та зниження споживання палива на опалення зменшують викиди забруднювальних речовин від житлового сектору на двадцять-тридцять відсотків. Утеплення зовнішніх стін мінеральною ватою або пінополістиролом товщиною десять-п'ятнадцять сантиметрів знижує тепловтрати через огорожувальні конструкції на сорок-п'ятдесят відсотків. Заміна старих дерев'яних вікон на енергоефективні склопакети з низькоемісійним покриттям зменшує інфільтрацію холодного повітря та втрати тепла через віконні прорізи на п'ятдесят-шістдесят відсотків. Модернізація систем опалення з встановленням

автоматичних регуляторів температури в кожному приміщенні та лічильників тепла дозволяє знижувати споживання енергоносіїв на двадцять-двадцять п'ять відсотків через підтримку комфортного температурного режиму без перегріву [33, с. 49]. Фінансування заходів з термомодернізації через механізми енергосервісних контрактів, де інвестор отримує частину економії від зниження витрат на опалення протягом п'ятнадцяти-двадцяти років, дозволяє реалізовувати проекти без залучення бюджетних коштів або кредитів мешканців.

Розвиток розподіленої генерації електроенергії з відновлюваних джерел, включаючи сонячні панелі на дахах будівель та вітрові турбіни на відкритих територіях, знижує навантаження на централізовану енергосистему та зменшує викиди від спалювання викопного палива. Встановлення сонячних панелей загальною потужністю п'ять-десять мегават на дахах адміністративних будівель та торгових центрів забезпечить генерацію до шести-дванадцяти гігават-годин електроенергії на рік та знизить викиди діоксиду вуглецю на чотири–вісім тисяч тонн. Вітрові турбіни потужністю два-три мегавати можуть розміщуватися на околицях міста в зонах з середньорічною швидкістю вітру понад п'ять метрів за секунду для максимізації коефіцієнта використання встановленої потужності. Зелений тариф для приватних домогосподарств з сонячними панелями стимулює інвестиції населення в відновлювану енергетику через гарантований викуп надлишкової електроенергії за ціною вищою за роздрібну. Комбіновані системи сонячних панелей з акумуляторами дозволяють зберігати енергію для використання в нічний час та підвищують автономність енергопостачання будівель при відключеннях електромережі.

Таблиця 3.6 – Комплекс заходів зі зменшення викидів забруднювальних речовин у Хмельницькій області

Захід	Цільовий сектор	Очікуване скорочення викидів, %	Термін реалізації	Вартість, млн USD	Джерело фінансування
Модернізація газоочисного обладнання на 5 підприємствах	Промисловість	NO <sub>2</sub> -30%, PM -50%	2026- 2028	3,5-5,0	Власні кошти, кредити
Розвиток електромобільності (мережа з 50 зарядних станцій)	Транспорт	CO -15%, NO <sub>x</sub> -10%	2026- 2030	2,0-3,0	Обласний бюджет, гранти
Впровадження інтелектуальних транспортних систем	Транспорт	CO -10%, NO <sub>x</sub> -8%	2027- 2029	1,5-2,5	Міський бюджет
Термомодернізація 200 багатоквартирних будинків	Житловий сектор	PM -25%, SO <sub>2</sub> -20%	2026- 2032	8,0-12,0	ESCO-контракти
Газифікація приватного сектору (5000 домогосподарств)	Житловий сектор	PM -80%, PAH -90%	2026- 2030	4,0-6,0	Державна програма
Створення низькоемісійної зони в центрі	Транспорт	NO <sub>2</sub> -25%, PM -20%	2028- 2029	0,3-0,5	Міський бюджет
Розвиток велоінфраструктури (120 км велодоріжок)	Транспорт	CO -3%, NO <sub>x</sub> -2%	2026- 2031	6,0-12,0	Міський бюджет, донори

Комплексна програма заходів зі зменшення викидів забруднювальних речовин в Хмельницькій області має включати модернізацію промислових

підприємств з впровадженням найкращих доступних технологій газоочищення, розвиток електромобільності та громадського транспорту, термомодернізацію житлового фонду та газифікацію приватного сектору як пріоритетні напрямки природоохоронної політики. Реалізація повного комплексу заходів протягом п'яти-семи років дозволить досягти зниження викидів діоксиду азоту на двадцять п'ять-тридцять відсотків, твердих частинок на сорок-п'ятдесят відсотків та оксиду вуглецю на тридцять-сорок відсотків від базового рівня дві тисячі двадцять п'ятого року. Загальна вартість впровадження програми оцінюється в двадцять п'ять-тридцять п'ять мільйонів доларів США з можливістю фінансування через комбінацію бюджетних коштів, власних інвестицій підприємств, міжнародної технічної допомоги та інноваційних фінансових механізмів типу енергосервісних контрактів.

Організаційне забезпечення реалізації програми потребує створення координаційної ради з представників усіх зацікавлених сторін для узгодження планів дій, моніторингу прогресу та оперативного вирішення проблем, що виникають у процесі впровадження заходів. Щорічний моніторинг виконання цільових показників зниження концентрацій пріоритетних поллютантів та скорочення викидів за секторами економіки дозволить своєчасно коригувати стратегію та перерозподіляти ресурси на найбільш ефективні напрямки. Інформаційно-освітня кампанія для населення про переваги екологічно чистого транспорту, енергоефективних технологій та відповідального споживання підвищить громадську підтримку природоохоронних ініціатив та стимулюватиме добровільні зміни поведінки в напрямку зменшення особистого внеску в забруднення атмосферного повітря.

## ВИСНОВКИ

Проведене дослідження нормативно-правової бази охорони атмосферного повітря виявило необхідність подальшої гармонізації українського законодавства з європейськими стандартами через впровадження директивних вимог до якості повітря та процедур оцінки впливу на довкілля. Особливості формування забруднення атмосфери в умовах антропогенного навантаження визначаються взаємодією викидів від стаціонарних та мобільних джерел з метеорологічними параметрами, що створює складну просторово-часову динаміку концентрацій поллютантів. Міжнародний досвід державного регулювання якості повітря демонструє ефективність комплексного підходу, що поєднує регуляторні інструменти, економічні механізми та інформаційні системи для досягнення цільових показників чистоти атмосфери. Нормативно-правові підходи до контролю якості атмосферного повітря базуються на встановленні граничних концентрацій забруднювальних речовин, нормуванні викидів та застосуванні системи відповідальності за порушення природоохоронного законодавства.

Аналітична оцінка стану атмосферного повітря Хмельницької області показала, що природно-кліматичні особливості регіону суттєво впливають на процеси поширення забруднювальних речовин через формування локальних циркуляційних систем та температурних інверсій. Структура джерел викидів характеризується переважанням енергетичного сектору та автомобільного транспорту, при цьому будівельна діяльність створює тимчасові, але значні викиди пилу та продуктів згоряння палива. Моніторинг якості атмосферного повітря виявив перевищення гранично допустимих концентрацій формальдегіду в шість цілих сім десятих разу та періодичні перевищення нормативів для діоксиду азоту і твердих частинок. Територіальний аналіз розподілу забруднення визначив промислову зону та центральну частину міста Хмельницького як території з найвищими індексами забруднення атмосфери, що потребують пріоритетного впровадження природоохоронних заходів.

Розроблений комплекс заходів з управління якістю атмосферного повітря включає оптимізацію системи регіонального моніторингу через розширення мережі автоматичних станцій спостереження з п'яти до десяти постів у різних функціональних зонах області. Впровадження сучасних цифрових інструментів передбачає створення регіонального порталу екологічної інформації з функціями візуалізації поточних даних, прогнозування якості повітря на добу вперед та системи сповіщень населення про несприятливі умови. Використання моделей машинного навчання для прогнозування концентрацій забруднювальних речовин дозволить досягти точності до вісімдесяти п'яти відсотків, що забезпечить своєчасне попередження населення та оптимізацію режимів роботи промислових об'єктів. Технічні та організаційні заходи мають розроблятися з урахуванням економічної доцільності впровадження та терміну окупності інвестицій. Технічні заходи зі зменшення викидів від стаціонарних джерел включають модернізацію очисного обладнання з встановленням електрофільтрів, систем десульфуризації та селективної каталітичної нейтралізації, що забезпечить зниження викидів на дев'яносто — дев'яносто п'ять відсотків. Організаційні заходи передбачають оптимізацію структури споживання палива з переходом на природний газ, впровадження автоматизованих систем контролю технологічних процесів та розвиток системи екологічного менеджменту на підприємствах.. Реалізація запропонованих природоохоронних заходів дозволить знизити концентрації забруднювальних речовин у житловій забудові на від 25 до 40 % та покращити екологічну ситуацію в місті. Практична реалізація розробленого комплексу заходів дозволить знизити середньорічні концентрації основних забруднювальних речовин на двадцять – тридцять відсотків протягом п'яти років та забезпечити відповідність якості атмосферного повітря санітарно-гігієнічним нормативам. Створення інтегрованої системи управління якістю повітря на регіональному рівні сприятиме зменшенню ризиків для здоров'я населення, покращенню екологічної ситуації та забезпеченню сталого розвитку Хмельницької області в умовах післявоєнної відбудови транспортної інфраструктури України.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Amann M. "Reducing global air pollution: the scope for further policy interventions" [electronic resource] *philosophical transactions of the royal society a* 378.2183 (2020): 20190331. — URL: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglcfindmkaj/<https://watermark02.silverchair.com/rsta.2019.0331.pdf> (дата звернення: 08.12.2025).
2. Awewomom J. "Addressing global environmental pollution using environmental control techniques: a focus on environmental policy and preventive environmental management" *discover environment* 2.1 (2024): 8. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44274-024-00033-5> (дата звернення: 08.12.2025).
3. Бабакін В.М. "нормування антропогенного навантаження на природне середовище. конспект лекцій." (2024). url: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/24563/1/нормування%20антропогенного%20навантаження%20на%20природне%20середовище.%20конспект%20лекцій.pdf> (дата звернення: 08.12.2025).
4. Baklanov A. "Advances in air quality modeling and forecasting." *global transitions* 2 (2020): 261-270. — URL: <https://pdf.sciencedirectassets.com/320046/1-s2.0-s2589791819x00031/1-s2.0-s2589791820300232/main.pdf> (дата звернення: 08.12.2025).
5. Білан, О. В. "Адміністративний аспект вдосконалення екологічного законодавства України з урахуванням досвіду Швейцарії" */науковий вісник міжнародного гуманітарного університету* (2025): 92. — URL: [https://vestnik-pravo.mgu.od.ua/archive/juspradenc74/74\\_2025.pdf#page=92](https://vestnik-pravo.mgu.od.ua/archive/juspradenc74/74_2025.pdf#page=92) (дата звернення: 10.12.2025).
6. Боголюбов, В.М., "Шляхи оптимізації системи моніторингу атмосферного повітря в Україні на регіональному рівні" *продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу* (2023): 189. — URL: <https://www.researchgate.net/profile/m->

[rumiantsev/publication/371416584\\_sekciya\\_2/links/6482d2f2b3dfd73b776deaaa/sekciya-2.pdf#page=191](http://rumiantsev/publication/371416584_sekciya_2/links/6482d2f2b3dfd73b776deaaa/sekciya-2.pdf#page=191) (дата звернення: 09.12.2025).

7. Botta, E. "Policies, regulatory framework and enforcement for air quality management: the case of japan" *oecd environment working papers* 156 (2020): 0\_1-60. –

URL::<https://www.proquest.com/openview/e93d0a07d001768d395da1d90e8de2a5/1?pq-origsite=gscholar&cbl=54480> (дата звернення: 08.12.2025).

8. Cifuentes, J. "Air temperature forecasting using machine learning techniques: a review" *energies* 13.16 (2020): 4215. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/16/4215> (date of appeal: 12.12.2025).

9. Гордієнко А. В. "Ефективне використання повітряного простору як складова оптимального механізму адміністрування навколишнього середовища: міжнародний досвід" / *науковий вісник міжнародного гуманітарного університету* (2024): 120. – URL: [https://vestnik-pravo.mgu.od.ua/archive/juspradenc68/68\\_2024.pdf#page=120](https://vestnik-pravo.mgu.od.ua/archive/juspradenc68/68_2024.pdf#page=120) (дата звернення: 08.12.2025).

10. Головченко Т. О. "Законодавство у сфері охорони атмосферного повітря: досвід європейського союзу та український вимір legislation in the field of atmospheric air protection: the experience of the european union and the ukrainian dimension" / *міжнародне право* 10 (2021). – URL::[http://www.lsej.org.ua/10\\_2021/152.pdf](http://www.lsej.org.ua/10_2021/152.pdf) (дата звернення: 11.12.2025).

11. Голуб О. "Нормативно-правові засади формування інституту дистанційного зондування землі в Україні" / *economics and law* 78.3 (2025): 77-87. – URL: <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/economiclaw/article/view/22506/20954> (дата звернення: 10.12.2025).

12. Gordienko A "Certain types of instruments of the administrative and legal mechanism for ensuring air protection and airspace safety" / *scientific works of national aviation university. series: law journal "air and space law"* 1.70: 9-15. – URL:<https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/uv/article/view/18474> (дата звернення: 08.12.2025).

13. Gössling S., "A global review of marine air pollution policies, their scope and effectiveness" / *ocean & coastal management* 212 (2021): 105824. mode of access: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj– URL: [/https://pdf.sciencedirectassets.com/271816/1-s2.0-s0964569121x00129/1-s2.0-s0964569121003070/main.pdf](https://pdf.sciencedirectassets.com/271816/1-s2.0-s0964569121x00129/1-s2.0-s0964569121003070/main.pdf) (date of appeal: 12.12.2025).

14. Григор'єв К. А. "Індикативні вимірювання поллютантів для вирішення атмосферних небезпек поблизу маслоекскракційного заводу" / *ольвійський форум–2024: стратегії країн причорноморського регіону в геополітичному просторі* (2024): 161. – URL: <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2348/1/оф-2024.%20радіаційна%2с%20техногенно-екологічна%20та%20біологічна%20безпека.pdf#page=161> (дата звернення: 08.12.2025).

15. Дудоров, О. "Забруднення атмосферного повітря як злочин проти довкілля: законодавчий, правозастосовний і теоретичний аспект" / *науковий вісник нді проблем досудового розслідування* 2 (2024). – URL: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/118838821/стаття\\_дудоров\\_письменский-libre.pdf](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/118838821/стаття_дудоров_письменский-libre.pdf) (дата звернення: 08.12.2025).

16. Душкін С. С. "Огляд онлайн-ресурсів для моніторингу стану довкілля: практичний інструментарій для студентів-екологів." *екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: збірник наукових статей* (2025): 247-254. –URL: [http://www.nieep.kharkov.ua/sites/default/files/sbornik\\_konf\\_2025.pdf#page=247](http://www.nieep.kharkov.ua/sites/default/files/sbornik_konf_2025.pdf#page=247) (дата звернення: 11.12.2025).

17. Зайцева К. О. "Забезпечення прав людей у сфері охорони природного навколишнього середовища" / *молодий вчений* (2025). – URL: <file:///c:/users/1/desktop/146-chapter%20manuscript-4852-1-10-20251013.pdf> (дата звернення: 12.12.2025).

18. Iskandaryan. "Air quality prediction in smart cities using machine learning technologies based on sensor data: a review" [*applied sciences* 10.7 (2020): 2401. – URL:<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/7/2401> (дата звернення: 11.12.2025).

19. Ganguly. "National clean air programme (ncap) for indian cities: review and outlook of clean air action plans" / *atmospheric environment: x* 8 (2020): 100096. – URL: <https://pdf.sciencedirectassets.com/320459/1-s2.0-s2590162120x00049/1-s2.0-s2590162120300368/main.pdf> (дата звернення: 09.12.2025).
20. Кірін Р. С. "Системні підходи до визначення ефективності інтеграції у правове поле єс через призму правових категорій та принципів екологічного права" [електронний ресурс]:/ *науковий вісник ужгородського національного університету. серія: право* 2.91 (2025): 221-231. – URL:<http://visnyk-pravo.uzhnu.edu.ua/article/view/343851/331623> (дата звернення: 08.12.2025).
21. Коваленко Ю. Л. "Моніторинг довкілля: конспект лекцій для студентів 2 і 3 курсів денної та 3 курсу заочної форм навчання за спеціальностями 183–технології захисту навколишнього середовища та 101–екологія" (2020). – URL: <https://files.znu.edu.ua/files/bibliobooks/inshi67/0049261.pdf> (дата звернення: 08.12.2025).
22. Коваленко Ю.Л. "Методичні рекомендації та завдання для практичних занять та самостійної роботи з навчальної дисципліни «нормативна база природоохоронної діяльності» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти 1 та 2 курсів денної та 2 курсу заочної форм навчання за спеціальності 183–технології захисту навколишнього середовища)" (2021). – URL: [https://eprints.kname.edu.ua/57592/1/2019%20105м%20практикум\\_нбпд.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/57592/1/2019%20105м%20практикум_нбпд.pdf) (дата звернення: 08.12.2025).
23. Ковальов О.. "До питання організації моніторингу атмосферного повітря" diss. нуцзу, 2023. – URL: [http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19579/1/1\\_до%20питання%20%20організації%20моніторингу%20атмосферного%20повітря.pdf](http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19579/1/1_до%20питання%20%20організації%20моніторингу%20атмосферного%20повітря.pdf) (дата звернення: 10.12.2025).
24. Kolomoiets T. "Protection of atmospheric air and airspace of ukraine: legal, regulatory, environmental and economic aspects" / *baltic journal of economic studies* 10.3 (2024): 168-179. – URL:

<http://www.baltijapublishing.lv/index.php/issue/article/view/2495/2488>

звернення: 08.12.2025).

25. Кравченко І.В. "Аналіз сучасного стану повітря та оцінка інгаляційного неканцерогенного ризику здоров'ю населення севєродонецько-лисичанської агломерації" *екологічні науки* 2 (2021): 35. – URL: [https://web.archive.org/web/20210722143106id\\_/http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/2/3.pdf](https://web.archive.org/web/20210722143106id_/http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/2/3.pdf) (дата звернення: 11.12.2025).

26. Ломакіна О. С. "Аналіз систем державного та громадського моніторингу атмосферного повітря в м. харків та харківській області" – URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2025/60/16.pdf> (дата звернення: 10.12.2025).

27. Maliarenko O. "Співставлення структури споживання палива та викидів забруднюючих речовин для визначення напрямів їхнього скорочення" / *system research in energy* 2а (78) (2024): 19-20. – URL: <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/843/750> (дата звернення: 09.12.2025).

28. Mitreska J. "Methods for urban air pollution measurement and forecasting: challenges, opportunities, and solutions. [electronic resource] /" *atmosphere* 14.9 (2023): 1441. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/9/1441> (date of the application: 12.12.2025).

29. Munsif R. "Industrial air emission pollution: potential sources and sustainable mitigation." *environmental emissions*. / intechopen, 2021.– URL: <https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=sgsteaaaqbaj&oi=fnd&pg=pa53> (date of the application: 12.12.2025).

30. Naizabayeva I. "Simulation-based assessment of urban pollution in almaty: influence of meteorological and environmental parameters." [electronic resource]. / *applied sciences* 15.12 (2025): 6391. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/12/6391> (date of the application: 12.12.2025).

31. Накемпій О. "Зниження ризиків техногенного впливу на довкілля під час виробничих процесів" *проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки* (2025): 76-79. (дата звернення: 08.12.2025).

32. Негода Н. "Характеристика основних порушень функціонально-планувальної структури урбоєкосистем внаслідок антропогенного навантаження" *техніка будівництва* 42 (2025): 145-153.: – URL: <http://tehbud.knuba.edu.ua/article/view/332078/324771> (дата звернення: 08.12.2025).
33. Петрук Р. "Екологічна безпека. курсове проектування." ["екологічна безпека. курсове проектування." – URL: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/petruk\\_2024\\_98.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/petruk_2024_98.pdf) (дата звернення: 08.12.2025).
34. Половко І. І. "Використання математичних моделей в екологічних дослідженнях" *науковий вісник ужгородського університету. серія «математика і інформатика»* 46.1 (2025): 256-261. – URL: <http://visnyk-math.uzhnu.edu.ua/article/view/332588/321589> (дата звернення: 08.12.2025).
35. Савчук О. О. "Сучасний стан екологічного законодавства України у сфері якості повітря: адаптація до стандартів єс." *міжнародний науковий журнал інтернаука. серія: юридичні науки* 4 (1) (2020): 81-88. (дата звернення: 12.12.2025).
36. Singhanian M. "Institutional framework of esg disclosures: comparative analysis of developed and developing countries.]/ " *journal of sustainable finance & investment* 13.1 (2023): 516-559 – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/20430795.2021.1964810> (date of the application: 11.12.2025).
37. Smith Z. *the environmental policy paradox*. routledge, 2022. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003098034/environmental-policy-paradox-zachary-smith-peter-jacques> (date of the application: 12.12.2025).
38. Стецюк Б. "Міжнародний досвід правового регулювання у сфері авіаційної діяльності." (2022). – URL: <https://dspace.usfa.edu.ua/bitstream/123456789/2286/1/stetsyuk%20mizhnarodnyi%20odosvid.pdf> (дата звернення: 12.12.2025).
39. Суха Н. О. "Місце індикативних вимірювань у системі моніторингу якості атмосферного повітря." *заступник головного редактора: нагорнева на*

(2020):/ (2020) - URL: [http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2020/4/4\\_2020.pdf#page=27](http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2020/4/4_2020.pdf#page=27)  
(дата звернення: 12.12.2025).

40. Тараймович І. В. "Екологічні аспекти виробництва та споживання: вплив на забруднення та вичерпання природних ресурсів." (2024). - URL: <https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/8433/демчук.pdf?sequence=1&isallowed=y> (дата звернення: 12.12.2025).

41. Togachynska O/ "Assessment of the quality of surface waters in khmelnytskyi region based on sanitary, hydrological, and toxicological indicators." *europaean dimensions of the sustainable development and academic–business forum: let's revive ukraine together.* 2023. – URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/919c020c-04a1-42e6-a31a-b964baf10ab5/content#page=219> (date of the application: 12.12.2025).

42. Трегуб О. А. "Розбудова системи моніторингу довкілля в умовах війни та повоєнної трансформації: правовий погляд." (2024). URL: [https://hozpravoreposit.kyiv.ua/bitstream/handle/765432198/262/моніторинг\\_еколог\\_ічне%20право.pdf?sequence=1&isallowed=y](https://hozpravoreposit.kyiv.ua/bitstream/handle/765432198/262/моніторинг_еколог_ічне%20право.pdf?sequence=1&isallowed=y) (дата звернення: 12.12.2025).

43. Trysnyuk V. "Механізм визначення кількісних характеристик рівня концентрації забруднюючих речовин викидами автомобільного транспорту." *екологічна безпека та природокористування* 38.2 (2021): 79-93. – URL: <https://es-journal.in.ua/article/view/236720> (дата звернення: 12.12.2025).

44. Уберман В. І. "Порівняльна характеристика європейського й українського правових механізмів регулювання скидання забруднювальних речовин." (2021). – URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f86bd8f4-80f2-4b5b-b37b-bdab78080aad/content> (дата звернення: 12.12.2025).

45. Vasiutynska K. "Methodology for indicator-based assessments of environmental hazards in urbanised areas: a case study of ukrainian regions." *urban agglomeration-extracting lessons for sustainable development.* intechopen, 2024. — URL: <https://www.intechopen.com/chapters/1176062> (date of the application: 12.12.2025).

46. Verghese S. "Optimal design of air quality monitoring networks: a systematic review." *stochastic environmental research and risk assessment* 36.10

(2022): 2963-2978. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-022-02187-1> (date of the application: 12.12.2025).

47. Федорова Ю. "Нові матеріали і технології у будівництві як елемент інноваційного забезпечення просторового розвитку територіальних громад." *науково-координаційний комітет* (2025): 58. – URL: [https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2025/10/zbirnyk\\_tez-konf-19-20.06.2025.pdf#page=58](https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2025/10/zbirnyk_tez-konf-19-20.06.2025.pdf#page=58) (дата звернення: 12.12.2025).

48. Чурилова Т. М. "До питання про правові проблеми моніторингу якості атмосферного повітря в Україні." *european potential for the development of legal science, legislation and law enforcement practice[electronic resource]* / (2021): 138. – URL: <https://files.znu.edu.ua/files/bibliobooks/inshi62/0046651.pdf#page=138> (дата звернення: 12.12.2025).

49. Shchesniak A. O. "Environmental safety assessment of soils in khmelnytskyi region based on chemical composition and acidity analysis." *naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu* 1 / (2025): 63-69. – URL: [https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2025/1/01\\_2025\\_shchesniak.pdf](https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2025/1/01_2025_shchesniak.pdf) (date of the application: 12.12.2025).

50. Yang C. "Policies, regulatory framework and enforcement for air quality management: the case of china." / (2020). – URL: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/03/policies-regulatory-framework-and-enforcement-for-air-quality-management-the-case-of-china\\_45a49c01/7d1d1a82-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/03/policies-regulatory-framework-and-enforcement-for-air-quality-management-the-case-of-china_45a49c01/7d1d1a82-en.pdf) (date of the application: 12.12.2025).

51. Yarde K. "The regulatory framework governing air services development and operations." *strategies for sustainable air services development*. routledge, / 2024. 45-66. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780429260681-3/regulatory-framework-governing-air-services-development-operations-kareem-yarde-chrystal-zhang> (date of appeal: 10.12.2025).

ДОДАТОК А

Результати апробації дослідження

ERNST LORTIKYAN INTERNATIONAL SCIENTIFIC PROJECT

"GLOBAL CREATIVE IDEAS FORUM 3.0"

SCIENTIFIC CONFERENCE-FORUM "UNITED PERSPECTIVES 24/7"

ISBN 978-617-7886-81-4

DOI: 10.61718/cros2025



# CROSSPOINT

## SCIENTIFIC ALMANAC

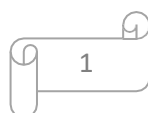
ERNST LORTIKYAN INTERNATIONAL SCIENTIFIC PROJECT  
"GLOBAL CREATIVE IDEAS FORUM 3.0"

SCIENTIFIC CONFERENCE-FORUM  
"UNITED PERSPECTIVES 24/7"



2025

[WWW.NEWROUTE.ORG.UA](http://WWW.NEWROUTE.ORG.UA)



ERNST LORTIKYAN INTERNATIONAL SCIENTIFIC PROJECT  
"GLOBAL CREATIVE IDEAS FORUM 3.0"  
SCIENTIFIC CONFERENCE-FORUM "UNITED PERSPECTIVES 24/7"



Ernst Lortikyan International  
Scientific Project

[Global Creative  
Ideas Forum 3.0

ISBN 978-617-7886-81-4

DOI: 10.61718/cros2025

Publisher ID: 7886

# CROSSPOINT

## SCIENTIFIC ALMANAC

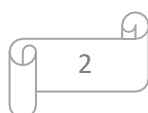
ERNST LORTIKYAN INTERNATIONAL SCIENTIFIC PROJECT  
"GLOBAL CREATIVE IDEAS FORUM 3.0"

SCIENTIFIC CONFERENCE-FORUM "UNITED PERSPECTIVES 24/7"

2025

- Education • Physical Education • Sports • Culture • Arts •
- Journalism • Humanities and Social Sciences • Business • Administration •
- Law • Hospitality • Tourism • Recreation • • Transportation • Security •
- Engineering • Mathematics • Manufacturing • Construction •
- Natural Sciences • Agriculture • Healthcare • Social Security •

[WWW.NEWROUTE.ORG.UA](http://WWW.NEWROUTE.ORG.UA)



# CROSSPOINT НАУКОВИЙ АЛЬМАНАХ

Засновано 2025 року. Альманах є електронним мультидисциплінарним неперіодичним науковим виданням. Міжнародний стандартний номер книжкового видання ISBN 978-617-7886-81-4. Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 8013 від 22.11.2023. Зареєстровано у глобальному реєстрі видавців Global Register of Publishers. Ідентифікатор видавця 7886. Видання отримує власний DOI. Видавництво зареєстровано у Crossref із власним префіксом 10.61718. Засновник та видавець: Соціально-гуманітарна науково-творча майстерня «Новий курс» (рік заснування – 1989) є науковою установою. Публікація у виданні є науковою працею, яка опублікована у вітчизняному електронному науковому неперіодичному виданні та підтверджує апробацію наукових досліджень автора. У науковому виданні можуть бути розміщені наукові повідомлення про розробки та праці, в т. ч. інформація про підготовку кваліфікаційних (дипломних) робіт, дисертаційних досліджень, творчих мистецьких проєктів тощо. У виданні розміщуються наукові публікації за повним переліком галузей знань. Автори несуть відповідальність за зміст (авторство та самостійність досліджень), точність та достовірність викладеного матеріалу. Редакція може не поділяти точку зору авторів. Контент видання оновлюється впродовж 2025 року. Наукові публікації оприлюднюються у межах проведення наукової конференції-форуму «United Perspectives 24/7» та міжнародного наукового проєкту Ernst Lortikyan International Scientific Project «Global Creative Ideas Forum 3.0» (Україна, м. Харків, Німеччина, м. Циттау, Велика Британія, м. Пул, США, м. Форт-Пірс). Розміщення публікації автора у науковому неперіодичному виданні є підтвердженням участі автора у науковій конференції-форумі «United Perspectives 24/7» та міжнародному науковому проєкті Ernst Lortikyan International Scientific Project «Global Creative Ideas Forum 3.0». За результатами проведення наукової конференції-форуму, реалізації міжнародного наукового проєкту та оприлюднення рукописів, автори отримують електронний сертифікат (30 годин – 1 ECTS credits). Сертифікати оприлюднюються на сайті видавця (згідно Порядку підвищення кваліфікації педагогічних і науково-педагогічних працівників, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 21 серпня 2019 р. № 800).

## Редакційна колегія

Кучин Сергій Павлович, головний редактор, доктор економічних наук, професор, академік Національної академії наук вищої освіти України  
Акіншина Ірина Миколаївна, кандидат філологічних наук, доцент  
Березовська-Чміль Олена Борисівна, кандидат політичних наук, доцент  
Внукова Ольга Миколаївна, кандидат педагогічних наук, доцент  
Гетьман Ірина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент  
Гришко Світлана Вікторівна, кандидат географічних наук, доцент  
Доброєр Наталія Вікторівна, кандидат культурології, доцент  
Дубовик Наталія Анатоліївна, кандидат політичних наук, доцент  
Єрошенко Олена Віталіївна, кандидат мистецтвознавства, доцент  
Калініна Ольга Сергіївна, кандидат культурології  
Карпинський Борис Андрійович, доктор економічних наук, професор  
Кислюк Любов Вікторівна, кандидат наук із соціальних комунікацій, доцент  
Кожедуб Олена Василівна, кандидат соціологічних наук, доцент  
Коробчук Людмила Іванівна, кандидат педагогічних наук, доцент  
Кучин Павло Захарович, заслужений артист України  
Кучина Тетяна Ігорівна, відповідальний секретар, магістр з маркетингу  
Мкртчян Оксана Альбертівна, доктор педагогічних наук, професор  
Пашкова Надія Ігорівна, кандидат філологічних наук, доцент  
Підлісна Ольга Вікторівна, кандидат мистецтвознавства, доцент  
П'ятакова Галина Павлівна, доктор педагогічних наук, професор  
Рассомахіна Ольга Андріївна, кандидат юридичних наук, доцент  
Сафонова Наталія Анатоліївна, кандидат філологічних наук, доцент  
Стефанишин Олена Василівна, кандидат історичних наук, доцент  
Сторож Олена Василівна, кандидат психологічних наук, доцент  
Тарасюк Лариса Сергіївна, доктор філософських наук, професор  
Федоренко Микола Олександрович, кандидат філософських наук, доцент  
Харченко Артем Вікторович, кандидат історичних наук, доцент  
Хожило Ірина Іванівна, доктор наук з державного управління, кандидат медичних наук  
Циватий Вячеслав Григорович, кандидат історичних наук, доцент, заслужений працівник освіти України  
Шевчук Інна Володимирівна, доктор наук з державного управління, професор  
Шептуха Олена Михайлівна, кандидат економічних наук, доцент  
Штулер Ірина Юріївна, доктор економічних наук, професор

**Crosspoint:** науковий альманах. Харків: СГ НТМ «Новий курс», 2025. ISBN 978-617-7886-81-4. DOI: 10.61718/cros2025. Публікація у межах наукової конференції-форуму «United Perspectives 24/7» та міжнародного наукового проєкту Ernst Lortikyan International Scientific Project «Global Creative Ideas Forum 3.0» (Україна, м. Харків, Німеччина, м. Циттау, Велика Британія, м. Пул, США, м. Форт-Пірс).

УДК 001 • ISBN 978-617-7886-81-4 • DOI: 10.61718/cros2025 • Publisher ID: 7886

Опубліковано на основі ліцензії Creative Commons Attribution License

© СГ НТМ «Новий курс», 2025

© Автори, 2025



спрямоване на досягнення адекватної діяльності, критерієм успіху якої є саме порозуміння. Йдеться про адекватність, відповідність публічних рішень потребам та очікуванням громадськості, суспільним реаліям, чітко ідентифікованим соціальним проблемам та оптимальним шляхам їх розв'язання. А така відповідність власне і є суспільно-ціннісним підґрунтям державного управління в цілому [3].

В Україні сьогодні в принципі сформовано необхідну законодавчу базу щодо правового забезпечення принципів відкритості й прозорості в діяльності органів влади та управління.

Аналіз викладеного матеріалу дає змогу уточнити основні дефініції категорії «взаємодія» як соціально-ціннісного виміру демократичного державного управління. Україна поки що пройшла досить короткий шлях утвердження демократичних принципів і норм, які ще далеко не повною мірою закріпилися не лише в практиці влаштування суспільного життя, але й у свідомості, і при цьому не лише в масовій, а й свідомості значної частини політичної еліти. Проте, обравши шлях свободи і демократії, спираючись на власний, нехай і не завжди позитивний, досвід та досвід країн усталеної демократії в організації державного управління на демократичних засадах, Україна має розробити свою власну соціально-ціннісну модель державного управління на основі його реальної прозорості та застосування дійових механізмів співпраці і взаємодії.

Взаємодія як організаційний принцип та ціннісний критерій державного управління передбачає розуміння державної влади не як сталого стану, а як системи, що весь час самоорганізується. Формування сучасної соціально-ціннісної системи державного управління, яка б відповідала потребам сьогодення й усталеним демократичним принципам її влаштування та функціонування, користувалася підтримкою і довірою з боку населення, неможливе без налагодження якісної співпраці та взаємодії як усередині системи державно-управлінських відносин між різними владними структурами, так і в системі взаємовідносин останніх з інститутами громадянського суспільства і громадськістю в цілому.

Джерела.

1. Телешун С. Нові українські політичні реалії і процес формування засад громадянського суспільства. Політичний менеджмент: наук. журнал / голов. ред. Ю. Ж. Шайгородський. 2008. № 1. С. 3–8.
2. Шайгородський Ю. Роль громадянського суспільства у становленні нової політичної реальності. Наукові записки ІПІЕНД ім. І. Ф. Кураса НАН України. 2014. Вип. 3 (71). С. 136–152.
4. Фолі М. В. Парадокс громадянського суспільства. Київ: Смолоскип, 2005. С. 867–881.

Публікацію та сертифікат розміщено за посиланням <https://www.newroute.org.ua/isp>

УДК 745/749

**Кузь Михайло Миколайович**

ORCID: 0009-0006-6466-2347

*Хмельницький національний університет*

## **РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У ХМЕЛЬНИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ**

*Розробка комплексної системи управління якістю атмосферного повітря Хмельницької області в умовах зростання антропогенного навантаження та необхідності гармонізації екологічної політики з європейськими стандартами. Проведено аналіз сучасного стану атмосферного повітря регіону на основі даних моніторингових спостережень Хмельницького обласного центру з гідрометеорології за 2020–2024 роки. Визначено основні джерела забруднення повітря та оцінено їхній вплив на екологічну ситуацію області. Досліджено чинну нормативно-правову базу України у сфері охорони атмосферного повітря та встановлено рівень її відповідності положенням Директиви 2008/50/ЄС щодо якості атмосферного повітря. Встановлено, що у 2020 році валові викиди забруднюючих речовин від стаціонарних джерел становили 20,32 тис. тонн, серед яких переважають суспендовані тверді частинки, діоксид азоту та оксид вуглецю. Запропоновано структуру інтегрованої системи моніторингу з використанням автоматизованих станцій контролю та геоінформаційних технологій. Розроблено методіку оцінки ризиків для здоров'я населення з урахуванням галузевої специфіки регіону. Обґрунтовано комплекс організаційно-технічних заходів зі зниження викидів та визначено очікуваний екологічний і економічний ефект від їх впровадження. Ключові слова: якість атмосферного повітря, система управління, моніторинг, забруднення, Хмельницька область, екологічна безпека, геоінформаційні технології, найкращі доступні технології, промислові викиди.*

**Постановка проблеми.** Забезпечення належної якості атмосферного повітря є одним із пріоритетних завдань екологічної політики України та головним фактором збереження здоров'я населення. Хмельницька область, розташована в центральній частині України, характеризується розвинутою промисловою інфраструктурою та інтенсивним сільськогосподарським виробництвом, що створює значне навантаження на атмосферне повітря. За даними Державної служби статистики, у 2023 році стаціонарними джерелами забруднення в області викинуто понад 28 тисяч тонн забруднюючих речовин, що становить серйозну загрозу для екологічної безпеки регіону. Водночас існуюча система управління якістю атмосферного повітря не повною мірою відповідає сучасним викликам та потребує вдосконалення з урахуванням європейських стандартів та інноваційних технологій. Актуальність розробки ефективної системи управління якістю атмосферного повітря посилюється необхідністю адаптації до вимог Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, зокрема Директиви 2008/50/ЄС про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи [2].

**Аналіз попередніх досліджень.** Проблемам управління якістю атмосферного повітря присвячені роботи багатьох вітчизняних та зарубіжних учених, що розглядають різні аспекти цієї складної міждисциплінарної проблеми. Теоретичні основи охорони атмосферного повітря та екологічної безпеки досліджували Адаменко О.М., Руденко Л.Г., які у своїх монографіях обґрунтували принципи раціонального природокористування, концепцію сталого розвитку та методологічні підходи до забезпечення екологічної безпеки регіонів України.

Методологічні аспекти моніторингу забруднення атмосфери розглянуто в працях Васенка О.Г., Осадчого В.І., де запропоновано системний підхід до організації спостережень за станом повітряного басейну, обґрунтовано вимоги до розміщення постів спостережень, періодичності вимірювань та методів обробки екологічної інформації. Автори розробили концептуальні засади створення національної системи моніторингу довкілля, визначили роль автоматизованих систем контролю та дистанційного зондування у забезпеченні достовірної інформації про стан атмосферного повітря. У їхніх роботах значна увага приділена інтеграції різних видів моніторингу - фонового, імпактного, регіонального - у єдину систему екологічного спостереження. Регіональні особливості забруднення атмосферного повітря промисловими центрами України вивчали Кучерявий В.П., Мельник Л.Г., які визначили основні закономірності розповсюдження забруднюючих речовин в урбанізованих територіях, встановили залежності між інтенсивністю промислового виробництва, характером забудови та рівнем забруднення повітря. Дослідження цих авторів виявили суттєві відмінності у структурі джерел викидів та їх вкладу у сумарне забруднення для різних типів міст - промислових, транспортних, агломерацій. Кучерявий В.П. у своїх працях з урбоекології обґрунтував підходи до формування екологічного каркасу міст, визначив оптимальні параметри озеленення для зниження концентрацій забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери.

Застосування геоінформаційних систем для екологічного моніторингу обґрунтовано в роботах Лялька В.І., Шевченка О.В., що дозволило підвищити ефективність просторового аналізу екологічних даних, створити динамічні моделі розповсюдження забруднення та оптимізувати мережу постів спостережень. Авторами розроблено методики використання даних дистанційного зондування Землі для оцінки стану атмосферного повітря, визначення джерел викидів та моделювання процесів перенесення забруднюючих речовин. Геоінформаційні технології дозволяють інтегрувати різномірну екологічну інформацію - результати наземних спостережень, космічні знімки, метеорологічні дані, цифрові моделі рельєфу - у єдину систему підтримки прийняття управлінських рішень. Економічні механізми природоохоронної діяльності досліджували Балацький О.Ф., Мельник Л.Г., Шапочка М.К., які розробили методики оцінки економічного збитку від забруднення довкілля, обґрунтували інструменти економічного стимулювання підприємств до впровадження природоохоронних заходів. У роботах цих авторів проаналізовано ефективність різних підходів до екологічного оподаткування, механізмів торгівлі квотами на викиди, систем екологічного страхування. Балацький О.Ф. розробив концепцію еколого-економічної збалансованості розвитку територій, запропонував показники для оцінки ефективності використання природних ресурсів та вкладення коштів у природоохоронні заходи [1].

Проблематика впровадження найкращих доступних технологій та методів управління в Україні досліджується у рамках проекту Німецького товариства міжнародного співробітництва «Найкращі доступні технології та методи управління для України», який виконується за дорученням Уряду Німеччини з 2019 року. У межах цього проекту перекладено та адаптовано до умов України тринадцять довідкових референтних документів з найкращих доступних технологій та методів управління, які діють у Європейському Союзі. Ці

документи стосуються різних галузей промисловості - енергетики, металургії, виробництва цементу, хімічної промисловості, управління відходами. Впровадження найкращих доступних технологій є головним елементом реформи дозвільної системи у сфері промислового забруднення відповідно до Директиви 2010/75/ЄС. Питання імплементації європейського екологічного законодавства в Україні розглядаються у працях Андрусевич Н., Алімова І., які аналізують стан транспозиції положень директив Європейського Союзу у національне законодавство, виявляють прогалини та розробляють пропозиції щодо вдосконалення нормативно-правової бази. Дослідники відзначають, що процес імплементації екологічних директив в Україні відбувається повільно через недостатність фінансових ресурсів, відсутність чіткої стратегії впровадження, обмежену спроможність державних органів та промислових підприємств.

Дослідження впливу забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення проводили Голубчиков С.М., Грушка Г.В., які встановили кореляційні залежності між концентраціями забруднюючих речовин у повітрі та захворюваністю населення на респіраторні та серцево-судинні хвороби. Автори розробили методики розрахунку ризиків для здоров'я від забруднення повітря, визначили пріоритетні забруднюючі речовини з точки зору їх впливу на здоров'я, обґрунтували економічні втрати від захворюваності, пов'язаної з погіршенням якості повітря. У їхніх працях показано, що зниження концентрацій твердих частинок РМ<sub>2.5</sub> на десять мікрограмів на кубічний метр може призвести до збільшення середньої тривалості життя населення на 0,6-1,2 року. Міжнародний досвід управління якістю атмосферного повітря узагальнено у працях європейських дослідників, зокрема у звітах Європейського агентства з навколишнього середовища. Аналіз цього досвіду свідчить про ефективність комплексного підходу, що поєднує жорстке нормативне регулювання, економічне стимулювання, технологічні інновації та активну участь громадськості. У країнах Європейського Союзу за період 1990-2020 років досягнуто суттєвого скорочення викидів основних забруднюючих речовин: діоксиду сірки - на 90 відсотків, оксидів азоту - на 60 відсотків, твердих частинок - на 30 відсотків, що супроводжувалося економічним зростанням.

Однак невирішеною частиною наукової проблеми залишається розробка комплексної адаптивної системи управління якістю атмосферного повітря для конкретних регіонів України з урахуванням їх промислово-економічних та природно-кліматичних особливостей, структури джерел викидів, демографічних характеристик, економічних можливостей та пріоритетів регіонального розвитку. Недостатньо дослідженими є питання інтеграції сучасних інформаційних технологій, зокрема геоінформаційних систем, автоматизованих систем контролю, математичного моделювання, у практику екологічного менеджменту на регіональному рівні. Потребують подальшого вивчення економічні механізми стимулювання промислових підприємств до впровадження найкращих доступних технологій в умовах обмежених фінансових ресурсів та необхідності одночасного вирішення інших соціально-економічних завдань [3, 4].

Відсутні комплексні дослідження особливостей формування та функціонування систем управління якістю атмосферного повітря в регіонах з переважанням підприємств харчової та переробної промисловості, які мають специфічну структуру викидів забруднюючих речовин. Недостатньо розробленими є методики оцінки ефективності природоохоронних заходів з урахуванням їх впливу не лише на стан довкілля, але й на економічні показники діяльності підприємств, здоров'я населення та якість життя у регіоні.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є розробка науково обґрунтованої системи управління якістю атмосферного повітря Хмельницької області, що забезпечить ефективний контроль за викидами забруднюючих речовин від стаціонарних та пересувних джерел, зниження негативного впливу забруднення на здоров'я населення, досягнення європейських стандартів якості повітря та сприяння сталому соціально-економічному розвитку регіону.

**Наукова новизна дослідження.** Наукова новизна дослідження полягає у вдосконаленні методичних підходів до управління якістю атмосферного повітря на регіональному рівні шляхом інтеграції автоматизованих систем моніторингу, геоінформаційних технологій, математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин та економічних механізмів стимулювання природоохоронної діяльності, а також у розробці адаптивної моделі прийняття управлінських рішень на основі багатокритеріальної оцінки ризиків для здоров'я населення, економічних витрат та екологічних вигод з урахуванням специфіки господарської діяльності Хмельницької області. Вперше запропоновано інтегрований підхід до управління якістю атмосферного повітря в регіонах з переважанням підприємств харчової та переробної промисловості, що базується на поєднанні традиційних методів контролю викидів з інноваційними технологіями моніторингу та прогнозування екологічної ситуації.

Удосконалено методику визначення пріоритетності природоохоронних заходів на основі комплексної оцінки їх впливу на стан атмосферного повітря, здоров'я населення та економіку регіону.

**Виклад основного матеріалу.** Системний аналіз стану атмосферного повітря Хмельницької області виявив комплекс екологічних проблем, зумовлених функціонуванням промислових підприємств, автотранспорту та сільськогосподарського виробництва. Основними стаціонарними джерелами забруднення є підприємства енергетики, харчової промисловості, виробництва будівельних матеріалів та хімічної промисловості, які викидають в атмосферу оксиди азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, тверді частинки та леткі органічні сполуки. Пересувні джерела забруднення, передусім автомобільний транспорт, щорічно викидають понад 150 тисяч тонн забруднюючих речовин, що становить основну частку валових викидів в області [8].

Розроблена система управління якістю атмосферного повітря базується на чотирьох взаємопов'язаних компонентах: моніторингу та контролю, нормативно-правового регулювання, організаційно-технічних заходів та економічного стимулювання. Перший компонент передбачає створення мережі автоматизованих станцій контролю якості повітря в населених пунктах області з чисельністю населення понад 20 тисяч осіб, оснащених сучасними газоаналізаторами для безперервного вимірювання концентрацій основних забруднюючих речовин. Станції інтегруються в єдину інформаційну систему з можливістю режиму реального часу передачі даних до регіонального центру екологічного моніторингу. Для просторового аналізу розповсюдження забруднюючих речовин застосовується геоінформаційна система, що включає цифрові картографічні матеріали, дані дистанційного зондування Землі, результати наземних спостережень та математичні моделі розсіювання домішок в атмосфері. Використання ГІС-технологій дозволяє визначати зони підвищеного забруднення, прогнозувати екологічні ризики та оптимізувати розміщення постів спостережень. Математичне моделювання здійснюється за допомогою програмного комплексу, що реалізує Гаусову модель розсіювання з урахуванням метеорологічних параметрів, характеристик джерел викидів та рельєфу місцевості [5].

Організаційно-технічний компонент системи управління охоплює комплекс заходів щодо зниження викидів на джерелі їх утворення. Для промислових підприємств розроблено рекомендації з впровадження найкращих доступних технологій відповідно до вимог Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди. Пріоритетними напрямками є модернізація котельних установок з переходом на газоподібне та біопаливо, встановлення сучасних систем пиловловлювання та газоочищення, оптимізація технологічних процесів з метою зменшення питомих викидів. Для підприємств енергетики рекомендовано впровадження когенераційних установок, що забезпечують комбіноване виробництво теплової та електричної енергії з підвищеним коефіцієнтом корисної дії. Особливу увагу приділено скороченню викидів від автотранспорту шляхом розвитку електромобільності, оновлення рухомого складу комунального транспорту, оптимізації транспортних потоків та створення екологічно чистих зон у центральних частинах міст. Запропоновано поетапне запровадження обмежень на в'їзд транспортних засобів низьких екологічних класів до санітарно-захисних зон лікувальних закладів та навчальних установ.

Економічний компонент системи управління передбачає застосування інструментів фінансового стимулювання природоохоронної діяльності. Розроблено механізм диференційованого екологічного оподаткування, що забезпечує зниження ставок екологічного податку для підприємств, які впроваджують найкращі доступні технології та досягають суттєвого зменшення викидів. Запропоновано створення обласного екологічного фонду для фінансування проєктів модернізації очисного обладнання та впровадження енергоефективних технологій на підприємствах малого та середнього бізнесу. Головним елементом системи управління є оцінка ризиків для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря. Розроблена методика базується на розрахунку індексів забруднення атмосфери та порівнянні фактичних концентрацій забруднюючих речовин з гранично допустимими концентраціями для різних груп населення. Встановлено, що в містах Хмельницький, Шепетівка та Кам'янець-Подільський періодично спостерігаються перевищення середньодобових концентрацій твердих часток РМ10 та діоксиду азоту, що створює підвищений ризик респіраторних захворювань для чутливих груп населення [6].

Для підвищення ефективності управління якістю атмосферного повітря розроблено систему інформування населення про екологічну ситуацію через веб-портал та мобільний додаток, що надають інформацію про поточний стан повітря, прогнози забруднення та рекомендації щодо обмеження активності на відкритому повітрі в періоди погіршення якості повітря. Впровадження системи публічного доступу до екологічної інформації відповідає вимогам

Орхуської конвенції та сприяє підвищенню екологічної культури населення. Економічна оцінка запропонованих заходів показала, що загальні інвестиції в розбудову системи управління якістю атмосферного повітря становлять приблизно 45 мільйонів гривень, включаючи витрати на придбання та встановлення автоматизованих станцій контролю, розробку програмного забезпечення, створення інформаційної інфраструктури та підготовку персоналу. Очікуваний економічний ефект від зниження захворюваності населення, підвищення продуктивності праці та збереження природних ресурсів оцінюється в 120 мільйонів гривень протягом п'ятирічного періоду експлуатації системи, що забезпечує коефіцієнт економічної ефективності на рівні 2,7 [7].

**Висновки.** Розроблена система управління якістю атмосферного повітря Хмельницької області являє собою комплексний підхід до вирішення екологічних проблем регіону, що інтегрує сучасні технології моніторингу, науково обґрунтовані організаційно-технічні заходи та ефективні економічні механізми. Впровадження автоматизованої мережі контролю якості повітря з використанням геоінформаційних технологій забезпечить отримання достовірної та оперативної інформації про стан атмосферного повітря, що є необхідною основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Реалізація запропонованих заходів щодо модернізації промислових підприємств, розвитку екологічного транспорту та впровадження найкращих доступних технологій дозволить знизити валові викиди забруднюючих речовин на 25-30 відсотків протягом п'яти років. Застосування економічних інструментів стимулювання природоохоронної діяльності сприятиме активізації підприємств у впровадженні екологічних інновацій. Результати дослідження можуть бути використані органами місцевого самоврядування для формування регіональної екологічної політики, природоохоронними службами для організації моніторингу та контролю, а також промисловими підприємствами для підвищення екологічної ефективності виробництва.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку інтелектуальних систем прогнозування якості атмосферного повітря з використанням методів машинного навчання, що дозволить підвищити точність короткострокових та довгострокових прогнозів. Актуальним напрямком є дослідження впливу зміни клімату на процеси розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері та розробка адаптаційних стратегій управління якістю повітря в умовах кліматичних змін. Перспективним є також вивчення можливостей застосування низьковуглецевих технологій та відновлюваних джерел енергії для зменшення викидів парникових газів та забруднюючих речовин одночасно.

Джерела.

1. Копанчук В. Екологічна безпека як складова національної безпеки України: сучасні тенденції та підходи. *Вісник Національної академії державного управління при Президенті України*. 2020. № 2(97). С. 45–49.
2. Руденко І. В. Щодо подолання екологічних проблем України в умовах війни. *Редакційна колегія*. 2023 р. 251 с.
3. Чайкіна А., Капашник Є., Карпенко В. Реалізація корпоративної соціальної відповідальності в умовах війни в Україні. *Національний університет Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка*, 2022. С. 6–9.
4. Семерня О. М., Любінський О. І., Федорчук І. В., Рудницька Ж. О., Семерня А. О. Екологічна безпека в умовах воєнного стану. *Економічні науки: науково-практичний журнал*. 2022. № 2(41). С. 62–66.
5. Стратегія розвитку міста Хмельницький до 2025 року. Хмельницький, 2017. URL: <http://www.khmelnitsky.com/pdf/Strat-rozv-Khmeldo2025.pdf> (дата звернення: 16.12.2025).
6. Стан довкілля м. Хмельницького та хмельницької області за результатами моніторингових спостережень. URL: <https://naurok.com.ua/standovkillya-m-hmelnickogo-ta-hmelnicko-oblasti-za-rezultatami-monitoringovihsposterezhen-233018.html> (дата звернення: 16.12.2025).
7. Програма охорони довкілля міста Хмельницького на 2021-2025 роки». URL: <https://khm.gov.ua/uk/content/pro-zatverdzhennya-programy-ohoronydovkillya-mista-hmelnycckogo-na-2016-2020-roku> (дата звернення: 16.12.2025).
8. Стратегія регіонального розвитку Хмельницької області на 2021- 2027 роки. URL: <https://km-oblrada.gov.ua/ctragiya-regionalnogo-rozvitku-khme> (дата звернення: 16.12.2025). Development of air quality management Khmelnytskyi region

Публікацію та сертифікат розміщено за посиланням <https://www.newroute.org.ua/isp>

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦІЇ-ФОРУМУ

Освіта, фізична культура і спорт	Культура, мистецтво та гуманітарні науки
Соціальні науки, журналістика та інформація	Інформаційні технології, інженерія
Бізнес, адміністрування та право	Виробництво, будівництво, транспорт
Безпека, правоохоронна діяльність та оборона	Природничі науки
Охорона здоров'я та соціальне забезпечення	Математика та статистика
Готельно-ресторанна справа, туризм та рекреація	Сільське та лісове господарство

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Кучин Сергій Павлович, головний редактор, доктор економічних наук, професор, академік Національної академії наук вищої освіти України  
Акіншина Ірина Миколаївна, кандидат філологічних наук, доцент  
Березовська-Чміль Олена Борисівна, кандидат політичних наук, доцент  
Внукова Ольга Миколаївна, кандидат педагогічних наук, доцент  
Гетьман Ірина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент  
Гришко Світлана Вікторівна, кандидат географічних наук, доцент  
Доброєр Наталія Вікторівна, кандидат культурології, доцент  
Дубовик Наталія Анатоліївна, кандидат політичних наук, доцент  
Єрошенко Олена Віталіївна, кандидат мистецтвознавства, доцент  
Калініна Ольга Сергіївна, кандидат культурології  
Карпинський Борис Андрійович, доктор економічних наук, професор  
Кислюк Любов Вікторівна, кандидат наук із соціальних комунікацій, доцент  
Кожедуб Олена Василівна, кандидат соціологічних наук, доцент  
Коробчук Людмила Іванівна, кандидат педагогічних наук, доцент  
Кучин Павло Захарович, заслужений артист України  
Кучина Тетяна Ігорівна, відповідальний секретар, магістр з маркетингу  
Мкртічян Оксана Альбертівна, доктор педагогічних наук, професор  
Пашкова Надія Ігорівна, кандидат філологічних наук, доцент  
Підлісна Ольга Вікторівна, кандидат мистецтвознавства, доцент  
П'ятакова Галина Павлівна, доктор педагогічних наук, професор  
Рассомахіна Ольга Андріївна, кандидат юридичних наук, доцент  
Сафонова Наталія Анатоліївна, кандидат філологічних наук, доцент  
Стефанишин Олена Василівна, кандидат історичних наук, доцент  
Сторож Олена Василівна, кандидат психологічних наук, доцент  
Тарасюк Лариса Сергіївна, доктор філософських наук, професор  
Федоренко Микола Олександрович, кандидат філософських наук, доцент  
Харченко Артем Вікторович, кандидат історичних наук, доцент  
Хожило Ірина Іванівна, доктор наук з державного управління, кандидат медичних наук  
Ціватий Вячеслав Григорович, кандидат історичних наук, доцент, заслужений працівник освіти України  
Шевчук Інна Володимирівна, доктор наук з державного управління, професор  
Шептуха Олена Михайлівна, кандидат економічних наук, доцент  
Штулер Ірина Юріївна, доктор економічних наук, професор

- © Національна академія наук і мистецтв України, 2025
- © Соціально-гуманітарна науково-творча майстерня «Новий курс», 2025
- © Науковий альманах «Crosspoint», 2025
- © Творча майстерня «Новий театр»™, 2025
- © International Scientific-creative Unit «Proton Global», 2025

ERNST LORTIKYAN INTERNATIONAL SCIENTIFIC PROJECT  
"GLOBAL CREATIVE IDEAS FORUM 3.0"  
SCIENTIFIC CONFERENCE-FORUM "UNITED PERSPECTIVES 24/7"

Наукове видання

**CROSSPOINT**

Науковий альманах

В рамках проведення  
наукової конференції-форуму «United Perspectives 24/7»  
та міжнародного наукового проекту  
Ernst Lortikyan International Scientific Project «Global Creative Ideas Forum 3.0»

ISBN 978-617-7886-81-4

DOI: 10.61718/cros2025

Видання змішаними мовами  
Відповідальний секретар – Кучина Т. І.  
Формат 60x90 1/8, А4, Гарнітура «Times New Roman»  
Creative Commons Attribution License CC BY



Видавець СГ НТМ «Новий курс»

Наукова установа

Пр. Перемоги, 77, оф. 179, м. Харків, 61174, Україна

Тел.: +380500301905, +380962250903

Telegram, Viber: +380970440309

[www.newroute.org.ua](http://www.newroute.org.ua), [info@newroute.org.ua](mailto:info@newroute.org.ua)

Свідоцтво про внесення суб\_екта видавничої справи до  
Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції ДК № 8013 від 22.11.2023  
Зареєстровано у Global Register of Publishers  
Зареєстровано у Crossref із власним префіксом 10.61718



**Приєднуйтесь**

Підписка <http://surl.li/vvfqkp>

Фейсбук-сторінка [www.facebook.com/newroute1989](http://www.facebook.com/newroute1989)

Телеграм <https://t.me/newroute1989>

Інстаграм [www.instagram.com/newroute1989](http://www.instagram.com/newroute1989)

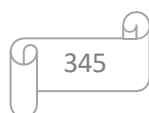
Вайбер <http://surl.li/nbtqz>

X <https://x.com/newroute1989>

Фейсбук-група [www.facebook.com/groups/secnr](http://www.facebook.com/groups/secnr)

**Будемо раді подальшій співпраці!**

[WWW.NEWROUTE.ORG.UA](http://WWW.NEWROUTE.ORG.UA)



ДОДАТОК Б

# СЕРТИФІКАТ

№ CROS2025200



Кузь Михайло Миколайович

Підтверджується:

- участь у Міжнародному проєкті Ernst Lortikyan International Scientific Project «Global Creative Ideas Forum 3.0»
- участь у науковій конференції-форумі «United Perspectives 24/7», 2025  
Україна, м. Харків, Німеччина, м. Циттау, Велика Британія, м. Пул, США, м. Форт-Пірс
- публікація у науковому альманасі «Crosspoint», ISBN 978-617-7886-81-4, DOI: 10.61718/cros2025, ID видавця 7886
- підвищення кваліфікації шляхом індивідуальної форми самоосвіти, неформальної освіти



Досягнуті результати підвищення кваліфікації: розвиток загальних та спеціальних компетентностей з метою забезпечення якості освіти та професійного розвитку  
Форма участі: інституційна. Обсяг: 30 год. / 1 кред. ЄКТС

- Національна академія наук і мистецтв України
- Соціально-гуманітарна науково-творча майстерня «Новий курс»
- International Scientific-creative Unit «Proton Global»
- Науковий альманах «Crosspoint»
- Творча майстерня «Новий театр»™



www.newroute.org.ua • info@newroute.org.ua • 22 грудня 2025 року  
Відповідальний секретар, Тетяна КУЧИНА