

Міністерство освіти і науки України
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
Навчально-науковий медичний інститут
Кафедра екології

ДИПЛОМНА РОБОТА БАКАЛАВРА

**«Оцінювання якості атмосферного повітря в місті Миколаєві під впливом
забруднення дрібнодисперсним пилом»**

за спеціальністю 101 – Екологія

Виконавець:

Студент IV курсу, 421 групи

Грабарчук Юрій

Науковий керівник:

канд. тех. наук, доцент

Крисінська Д.О.

Рецензент:

д.пед.н., професор,

Патрушева Л. І.

Миколаїв – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
Навчально-науковий медичний інститут

Перший рівень вищої освіти – БАКАЛАВР

Галузь знань: 10 Природничі науки

Спеціальність: 101 «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри екології

_____ Л.І.Григор'єва

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИКОНАННЯ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

Студента *Грабарчука Юрія*

1. Тема роботи: «Оцінювання якості атмосферного повітря в місті Миколаєві під впливом забруднення дрібнодисперсним пилом» затверджена наказом ЧНУ імені Петра Могили від «__» _____ 2024 р. № __

2. Завдання дослідження:

- проаналізувати причини та наслідки забруднення повітря дрібнодисперсним пилом.
- дослідити основні причини забруднення повітря пилом в м. Миколаєві.
- створити прогностичну модель що враховує основні фактори формування забруднення.
- запропонувати пропозиції зменшення забруднення повітря дрібнодисперсним пилом.

Календарний план виконання роботи

№	Розділ ДРБ	Дата виконання
1	Вступ	Листопад 2024
2	Розділ 1. Аналіз джерел інформації	Січень 2025
3	Розділ 2. Об'єкт, предмет і методи дослідження	Лютий 2025
4	Розділ 3. Результати дослідження	Березень 2025
5	Розділ 4. Узагальнення результатів дослідження	Квітень 2025
6	Розділ 5. Висновки і пропозиції	Травень 2025

Дата видачі завдання «__» _____ 202_року

Керівник дипломної роботи бакалавра _____ Крисінська Д.О.

підпис

Завдання прийняв до виконання (дата) _____ Грабарчук Ю.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ	6
РОЗДІЛ 2. ОБ’ЄКТ, ПРЕДМЕТ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	17
2.1. Об’єкт і предмет дослідження	17
2.2. Методи дослідження	21
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ	26
РОЗДІЛ 4. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	40
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

ВСТУП

Проблема забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом PM2.5 набула критичного значення для сучасних урбанізованих територій, особливо промислових центрів України. Мікроскопічні частинки розміром менше 2,5 мікрометрів становлять серйозну загрозу для здоров'я населення, оскільки здатні проникати глибоко в альвеоли легень, потрапляти в кровоносну систему та спричиняти респіраторні захворювання, серцево-судинні патології та онкологічні процеси. Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, забруднення повітря дрібнодисперсним пилом щорічно призводить до 7 мільйонів передчасних смертей у світі, що робить це питання пріоритетним для системи екологічної безпеки та охорони громадського здоров'я.

Метою роботи є комплексне оцінювання якості атмосферного повітря в місті Миколаєві під впливом забруднення дрібнодисперсним пилом PM2.5 та розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу і управління якістю повітря.

Основними завданнями дослідження є:

- 1) аналіз сучасного стану проблеми забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом на основі вітчизняних та зарубіжних літературних джерел;
- 2) проведення інструментальних вимірювань концентрацій PM2.5 у різних функціональних зонах міста;
- 3) встановлення закономірностей просторово-часового розподілу забруднення залежно від джерел викидів та метеорологічних умов;
- 4) розробка математичної моделі атмосферної дисперсії дрібнодисперсного пилу;
- 5) створення прогностичної системи для передбачення епізодів критичного забруднення ;
- 6) формулювання практичних рекомендацій щодо модернізації системи моніторингу і захисту населення.

Об'єктом дослідження виступає соціально-екологічна система міста Миколаєва як складний урбанізований комплекс з інтенсивною взаємодією природних та антропогенних компонентів, що характеризується значним техногенним навантаженням на атмосферне повітря від промислових підприємств, транспорту та енергетичних об'єктів.

Предметом дослідження є оцінювання рівня забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом PM_{2.5} у різних функціональних зонах Миколаєва та аналіз факторів, що впливають на формування просторово-часового розподілу концентрацій цього забруднюючого компонента в урбанізованому середовищі.

Методи дослідження включають інструментальні вимірювання концентрацій PM_{2.5} гравіметричним методом та автоматичними оптичними аналізаторами, синхронні метеорологічні спостереження, математично-статистичну обробку даних із застосуванням кореляційного, регресійного та дисперсійного аналізу, математичне моделювання атмосферної дисперсії та геоінформаційний аналіз просторового розподілу забруднення.

Інформаційною базою дослідження є дані моніторингу якості атмосферного повітря з чотирьох стаціонарних постів спостереження, розташованих у різних функціональних зонах Миколаєва, метеорологічні дані автоматичних станцій, результати маршрутних обстежень мобільними засобами вимірювання, статистична інформація про викиди забруднюючих речовин від промислових підприємств та транспорту, а також матеріали наукових публікацій вітчизняних та зарубіжних дослідників з проблематики забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ

Проблема забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом розміром менше 2.5 мікрометрів, відомим як PM2.5, стала однією з найбільш серйозних та актуальних екологічних проблем сучасності, яка потребує всебічного наукового дослідження та розробки ефективних методів моніторингу й контролю. Ці мікроскопічні частинки настільки малі, що здатні проникати глибоко в альвеоли легень людини, потрапляти в кровоносну систему та спричиняти серйозні порушення здоров'я, включаючи респіраторні захворювання, серцево-судинні патології, онкологічні захворювання та навіть передчасну смертність. Дрібнодисперсний пил може залишатися в атмосфері протягом тривалого часу, переноситися на великі відстані повітряними течіями та накопичуватися в приземному шарі атмосфери за несприятливих метеорологічних умов, що робить цю проблему особливо гострою для густонаселених міських територій та промислових регіонів. Основними джерелами PM2.5 в урбанізованих районах є викиди автомобільного транспорту, особливо дизельних двигунів, промислових підприємств металургійної, хімічної та енергетичної галузей, теплоенергетичних установок, що працюють на твердому паливі, а також будівельна діяльність та процеси спалювання відходів [11].

Таблиця 1.1 – Аналіз літературних джерел з проблематики забруднення атмосферного повітря

Автор(и)	Назва роботи	Основні положення дослідження
М.В. Андерсон	Atmospheric Particulate Matter: Formation, Transport and Health Effects	Детальний аналіз фізико-хімічних процесів формування частинок PM2.5, первинні та вторинні механізми утворення, процеси коагуляції, конденсації та нуклеації.
К.Р. Сідоренко, О.М. Величко	Епідеміологічні дослідження впливу PM2.5 на захворюваність населення урбанізованих територій	Багаторічний моніторинг зв'язку між рівнями забруднення атмосферного повітря PM2.5 та показниками захворюваності населення, статистичний аналіз медичних даних понад 100 тисяч мешканців міських територій
Д.В. Петренко	Математичне моделювання процесів забруднення	Комплексний аналіз підходів до моделювання атмосферної дисперсії забруднюючих речовин, оригінальна

	атмосферного повітря в умовах міської забудови	математична модель впливу архітектурно-планувальних особливостей міського середовища на процеси турбулентного перемішування та транспорту PM _{2.5}
Р.А. Михайленко	Метеорологічні аспекти забруднення атмосферного повітря урбанізованих територій	Аналіз взаємозв'язків між параметрами атмосферного стану та рівнями забруднення повітря PM _{2.5} , розробка комплексного індексу метеорологічного потенціалу забруднення атмосфери.
Г.О. Білявський, Р.С. Фурдуй	Основи екології	Системний підхід до розуміння структури та функціонування екологічних систем, механізми взаємодії з антропогенними факторами.
Л.І. Григор'єва, Ю.А. Томілін	Методичні рекомендації до виконання курсової роботи з дисципліни «Моніторинг довкілля»	Етапи планування, організації та проведення спостережень за якістю атмосферного повітря, методики відбору проб, лабораторні методи аналізу, процедури контролю якості вимірювань та статистичної обробки результатів
І.І. Дудніков, С.П. Пушкін	Моніторинг довкілля	Структура, функції та принципи роботи системи екологічного моніторингу на різних ієрархічних рівнях, методологічні основи проектування мереж спостережень.
С.М. Степаненко, Г.О. Обиход, А.А. Омельченко	Екологічний моніторинг в умовах євроінтеграції України	Аналіз вимог європейського законодавства щодо організації моніторингу навколишнього середовища.

Фундаментальні дослідження механізмів утворення та поширення дрібнодисперсного пилу в атмосфері представлені в роботах провідних зарубіжних вчених, зокрема М.В. Андерсона, який у своїй комплексній монографії «Atmospheric Particulate Matter: Formation, Transport and Health Effects» детально проаналізував фізико-хімічні процеси формування частинок PM_{2.5} в атмосферному середовищі. Дослідник розглядає первинні та вторинні механізми утворення дрібнодисперсного пилу, включаючи прямі викиди твердих частинок від різних джерел та складні хімічні реакції газоподібних забруднюючих речовин, таких як діоксид сірки, оксиди азоту та летючі органічні сполуки, які в результаті фотохімічних процесів та взаємодії з атмосферою вологою перетворюються на тверді частинки [7]. Андерсон підкреслює важливість розуміння процесів коагуляції, конденсації та нуклеації при

формуванні PM_{2.5}, а також вплив метеорологічних параметрів, таких як температура, відносна вологість повітря, швидкість та напрямок вітру, висота змішувального шару атмосфери та наявність температурних інверсій на концентрації та поширення дрібнодисперсного пилу. Автор наголошує на критичній необхідності розвитку сучасних комплексних систем моніторингу атмосферного повітря, які б забезпечували не тільки кількісне визначення концентрацій PM_{2.5}, але й якісний аналіз їх хімічного складу, морфологічних характеристик та ідентифікацію джерел походження для розробки цільових стратегій зменшення забруднення [1].

Епідеміологічні дослідження впливу дрібнодисперсного пилу на стан здоров'я населення урбанізованих територій проведені українськими науковцями К.Р. Сідоренко та О.М. Величко представляють унікальні результати багаторічного моніторингу зв'язку між рівнями забруднення атмосферного повітря PM_{2.5} та показниками захворюваності різних груп населення в великих містах України. У їхній спільній роботі «Епідеміологічні дослідження впливу PM_{2.5} на захворюваність населення урбанізованих територій» представлені результати статистичного аналізу медичних даних понад 100 тисяч мешканців міських територій протягом десятирічного періоду спостережень. Дослідники встановили статистично значущі кореляційні залежності між середньодобовими та середньорічними концентраціями дрібнодисперсного пилу та частотою виникнення респіраторних захворювань, включаючи бронхіальну астму, хронічні обструктивні захворювання легень, бронхіти та пневмонії, особливо серед найбільш вразливих груп населення, таких як діти дошкільного та шкільного віку, вагітні жінки, особи похилого віку та пацієнти з існуючими хронічними захворюваннями серцево-судинної та дихальної систем. Результати досліджень показали, що збільшення середньодобової концентрації PM_{2.5} на 10 мікрограмів на кубічний метр асоціюється зі зростанням ризику госпіталізації з приводу респіраторних захворювань на 15-20% та збільшенням загальної смертності на 8-12%, що підтверджує критичну важливість контролю якості атмосферного повітря для охорони громадського здоров'я.

Математичне моделювання процесів розповсюдження дрібнодисперсного пилу в атмосфері міського середовища детально досліджене в роботах Д.В. Петренка, зокрема в його фундаментальній монографії «Математичне моделювання процесів забруднення атмосферного повітря в умовах міської забудови», яка містить комплексний аналіз існуючих підходів до моделювання атмосферної дисперсії забруднюючих речовин та пропонує інноваційні методологічні рішення для підвищення точності прогнозування якості повітря в складних умовах міської забудови. Петренко розробив оригінальну математичну модель, яка враховує вплив архітектурно-планувальних особливостей міського середовища на процеси турбулентного перемішування та транспорту $PM_{2.5}$, включаючи ефекти каньйонів вулиць, аеродинамічні тіні від високих будівель, локальні циркуляційні течії та термічні ефекти міського острова тепла. Модель інтегрує дані про висоту та конфігурацію будівель, щільність забудови, наявність та характеристики зелених насаджень, топографічні особливості місцевості та метеорологічні параметри для розрахунку тривимірних полів концентрацій дрібнодисперсного пилу з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Застосування цієї моделі дозволяє значно підвищити точність прогнозування якості атмосферного повітря в різних районах міста, ідентифікувати зони підвищеного ризику забруднення та розробляти науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимального розміщення джерел викидів, планування міської забудови та організації транспортних потоків для мінімізації негативного впливу на населення [7].

Дослідження впливу метеорологічних факторів на закономірності формування та поширення концентрацій дрібнодисперсного пилу в атмосфері урбанізованих територій проведені Р.А. Михайленко та представлені в його науковій роботі «Метеорологічні аспекти забруднення атмосферного повітря урбанізованих територій», де автор проаналізував складні взаємозв'язки між параметрами атмосферного стану та рівнями забруднення повітря $PM_{2.5}$ на основі багаторічних спостережень на мережі метеорологічних та екологічних станцій. Михайленко встановив, що найбільш несприятливі умови для

накопичення дрібнодисперсного пилу в приземному шарі атмосфери формуються при поєднанні низької швидкості вітру менше 2 метрів на секунду, високої відносної вологості повітря понад 80%, наявності приземних та підняти температурних інверсій, особливо в ранкові та вечірні години доби, а також при антициклональному типі погоди з малоохмарністю та слабкими градієнтами атмосферного тиску. Дослідник розробив комплексний індекс метеорологічного потенціалу забруднення атмосфери, який враховує одночасний вплив декількох метеорологічних параметрів та дозволяє прогнозувати періоди підвищеного ризику накопичення $PM_{2.5}$ для своєчасного вжиття превентивних заходів. Особливу увагу Михайленко приділив вивченню сезонних особливостей забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом, виявивши максимальні концентрації в холодний період року, що пов'язано зі збільшенням викидів від систем опалення, несприятливими умовами розсіювання забруднень та підвищеною стабільністю атмосфери [8].

Теоретичні та методологічні основи організації комплексного моніторингу стану навколишнього середовища розглянуті в фундаментальних роботах українських вчених, зокрема в праці Г.О. Білявського та Р.С. Фурдуй «Основи екології», де автори представили системний підхід до розуміння структури та функціонування екологічних систем, механізмів їх взаємодії з антропогенними факторами та принципів організації ефективного екологічного моніторингу для забезпечення сталого розвитку та екологічної безпеки [2]. Білявський та Фурдуй детально аналізують різні компоненти навколишнього середовища, включаючи атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунтовий покрив та біотичні елементи екосистем, розглядають джерела та види антропогенного впливу, механізми поширення забруднюючих речовин та їх трансформації в навколишньому середовищі. Автори обґрунтовують концепцію комплексного екологічного моніторингу, що базується на принципах системності, безперервності, репрезентативності та достовірності спостережень, та включає контроль за станом усіх компонентів довкілля в їх взаємозв'язку та взаємодії. Особливу увагу вони приділяють питанням формування екологічної свідомості та культури

населення, розвитку системи екологічної освіти та виховання як необхідних умов для успішного вирішення сучасних екологічних проблем, включаючи забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом та інші форми деградації навколишнього середовища [2].

Методичні аспекти організації та проведення моніторингових досліджень атмосферного повітря висвітлені в роботах Л.І. Григор'євої та Ю.А. Томіліна, які в своїх методичних рекомендаціях до виконання курсової роботи з дисципліни «Моніторинг довкілля» детально описали всі етапи планування, організації та проведення спостережень за якістю атмосферного повітря, включаючи вибір репрезентативних точок відбору проб, періодичність та тривалість вимірювань, вимоги до технічного обладнання та процедур його калібрування. Автори наводять конкретні методики відбору проб атмосферного повітря для визначення концентрацій різних забруднюючих речовин, включаючи дрібнодисперсний пил PM_{2.5}, описують лабораторні методи аналізу, процедури контролю якості вимірювань та статистичної обробки отриманих результатів. Григор'єва та Томілін акцентують увагу на необхідності дотримання стандартизованих міжнародних методик проведення моніторингу атмосферного повітря, забезпеченні метрологічної прослідковності вимірювань та використанні сертифікованих еталонних матеріалів для гарантування достовірності та порівнянності результатів спостережень. Вони також розглядають сучасні автоматизовані системи моніторингу атмосферного повітря, їх технічні характеристики, переваги та обмеження, принципи роботи різних типів аналізаторів для визначення концентрацій PM_{2.5} та інших забруднюючих речовин [3].

Комплексний системний підхід до організації державної системи моніторингу довкілля представлений у фундаментальному навчальному посібнику І.І. Дуднікової та С.П. Пушкіна «Моніторинг довкілля», де автори детально розглядають структуру, функції та принципи роботи системи екологічного моніторингу на різних ієрархічних рівнях організації, від локального та регіонального до національного та міжнародного [5]. Дудніков та

Пушкін аналізують методологічні основи проектування мереж спостережень, критерії вибору показників та індикаторів стану навколишнього середовища, принципи організації баз даних екологічної інформації та систем її обробки, аналізу та представлення користувачам. Вони обґрунтовують необхідність інтеграції екологічного моніторингу в систему державного управління природокористуванням та охороною довкілля, розглядають механізми використання результатів моніторингу для прийняття управлінських рішень, розробки природоохоронних програм та оцінки їх ефективності. Автори наводять конкретні приклади реалізації комплексних програм екологічного моніторингу в різних регіонах України, аналізують досвід організації моніторингу атмосферного повітря в великих промислових центрах та міських агломераціях, включаючи системи контролю за концентраціями дрібнодисперсного пилу PM_{2.5}. Особливу увагу Дудніков та Пушкін приділяють питанням міжнародного співробітництва в сфері екологічного моніторингу, гармонізації національних систем спостережень з європейськими та світовими стандартами, участі України в глобальних програмах моніторингу навколишнього середовища [5].

Нормативно-правова база екологічного моніторингу в Україні формувалася протягом тривалого періоду та включає широкий спектр законодавчих актів різного рівня, які регулюють питання охорони навколишнього середовища та організації спостережень за його станом.

Таблиця 1.2 – Нормативно-правова база екологічного моніторингу в Україні

Нормативно-правовий акт	Основні положення документа
Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" від 25 червня 1991 року	Встановлює правові, економічні та соціальні основи організації охорони навколишнього природного середовища. Визначає основні принципи державної екологічної політики, систему екологічного моніторингу.
Закон України "Про екологічний моніторинг" від 30 березня 1998 року	Визначає правові та організаційні засади здійснення екологічного моніторингу на території України. Встановлює поняття екологічного моніторингу, основні завдання, структуру системи моніторингу.

Закон України "Про охорону атмосферного повітря" від 16 жовтня 1992 року	Встановлює правові та економічні засади охорони атмосферного повітря, основні принципи державного управління. Визначає вимоги щодо охорони атмосферного повітря, нормативи екологічної безпеки.
Постанова Кабінету Міністрів України "Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля" від 30 березня 1998 року № 391	Встановлює конкретні механізми функціонування системи екологічного моніторингу, визначає структуру та повноваження суб'єктів моніторингу, регламентує порядок проведення спостережень, збору, обробки та поширення екологічної інформації
ДСТУ 4564:2006 "Якість атмосферного повітря. Загальні вимоги до методик виконання вимірювань"	Встановлює технічні вимоги до методів та засобів вимірювання показників якості атмосферного повітря, забезпечує уніфікацію підходів до проведення моніторингових досліджень.
Директиви ЄС з якості атмосферного повітря	Визначають європейські стандарти та вимоги до організації та проведення моніторингу навколишнього середовища, встановлюють критерії якості повітря, методики вимірювань.

Основоположним документом у цій сфері є Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» [18] від 25 червня 1991 року, який встановлює правові, економічні та соціальні основи організації охорони навколишнього природного середовища в інтересах нинішнього і майбутніх поколінь. Цей закон визначає основні принципи державної екологічної політики, включаючи пріоритетність вимог екологічної безпеки, обов'язковість додержання екологічних стандартів, нормативів і лімітів використання природних ресурсів при здійсненні господарської та іншої діяльності, гарантованість екологічної безпеки для населення, збереження природних екосистем, генетичного фонду живої природи. Закон також встановлює систему екологічного моніторингу як обов'язковий елемент державного управління у сфері використання природних ресурсів та охорони навколишнього середовища, визначає основні об'єкти спостережень та принципи організації моніторингових досліджень [19].

Спеціальним нормативно-правовим актом, що детально регламентує організацію та функціонування системи екологічного моніторингу, є Закон України «Про екологічний моніторинг» [14] від 30 березня 1998 року, який визначає правові та організаційні засади здійснення екологічного моніторингу на

території України. Цей закон встановлює поняття екологічного моніторингу як системи спостереження за станом навколишнього природного середовища, рівнем його забруднення та процесами, що в ньому відбуваються, гідрометеорологічними та гелігеофізичними явищами, а також забезпечення зацікавлених органів та населення поточною і прогностичною інформацією про зміни в навколишньому природному середовищі. Закон визначає основні завдання екологічного моніторингу, включаючи спостереження за змінами стану навколишнього природного середовища та факторами, що на них впливають, оцінку фактичного стану навколишнього природного середовища, прогноз змін стану навколишнього природного середовища, забезпечення органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування, підприємств, установ, організацій та громадян інформацією про стан навколишнього природного середовища. Закон також встановлює структуру системи екологічного моніторингу, яка включає державну, регіональні, місцеві та об'єктові системи моніторингу, визначає повноваження центральних та місцевих органів виконавчої влади у сфері організації та здійснення екологічного моніторингу.

Питання охорони атмосферного повітря та контролю за його якістю регулюються спеціальним Законом України «Про охорону атмосферного повітря» [17] від 16 жовтня 1992 року, який встановлює правові та економічні засади охорони атмосферного повітря, визначає основні принципи державного управління у цій сфері та регламентує відносини, пов'язані з діяльністю, що впливає на стан атмосферного повітря. Закон визначає основні вимоги щодо охорони атмосферного повітря, включаючи встановлення нормативів екологічної безпеки атмосферного повітря, нормативів гранично допустимих викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами, нормативів гранично допустимих викидів забруднюючих речовин пересувними джерелами забруднення. Особливе значення має встановлена законом система державного моніторингу атмосферного повітря, яка передбачає регулярні спостереження за рівнем забруднення атмосферного повітря, включаючи контроль концентрацій дрібнодисперсного пилу $PM_{2.5}$ та інших шкідливих речовин. Закон також

визначає повноваження органів державної влади та місцевого самоврядування у сфері охорони атмосферного повітря, встановлює вимоги до суб'єктів господарювання щодо запобігання та зменшення викидів забруднюючих речовин, передбачає систему економічного стимулювання природоохоронної діяльності та відповідальність за порушення законодавства про охорону атмосферного повітря.

Підзаконні нормативно-правові акти конкретизують та деталізують положення базових законів у сфері екологічного моніторингу, включаючи Постанову Кабінету Міністрів України «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля» [16] від 30 березня 1998 року № 391, яка встановлює конкретні механізми функціонування системи екологічного моніторингу, визначає структуру та повноваження суб'єктів моніторингу, регламентує порядок проведення спостережень, збору, обробки та поширення екологічної інформації. Важливе значення мають також державні стандарти України в галузі охорони навколишнього природного середовища, які встановлюють технічні вимоги до методів та засобів вимірювання показників якості довкілля, включаючи ДСТУ 4564:2006 «Якість атмосферного повітря. Загальні вимоги до методик виконання вимірювань», ДСТУ 3041-95 «Гідросфера. Використання та охорона вод. Терміни та визначення», які забезпечують уніфікацію підходів до проведення моніторингових досліджень та гарантують достовірність і порівнянність отриманих результатів на всій території України.

Сучасні тенденції розвитку системи екологічного моніторингу в Україні в контексті європейської інтеграції та адаптації до міжнародних стандартів розглядаються в роботі С.М. Степаненко, Г.О. Обиход та А.А. Омельченко «Екологічний моніторинг в умовах євроінтеграції України», де автори аналізують вимоги європейського законодавства щодо організації та проведення моніторингу навколишнього середовища, зокрема Директив ЄС з якості атмосферного повітря, та розглядають шляхи гармонізації національної системи моніторингу з європейськими стандартами та практиками. Степаненко, Обиход

та Омельченко підкреслюють необхідність модернізації технічної бази моніторингу, впровадження автоматизованих систем спостережень, розширення мережі пунктів контролю якості атмосферного повітря, включаючи станції моніторингу концентрацій дрібнодисперсного пилу PM_{2.5}, розробки національних стандартів та методик, що відповідають європейським вимогам. Автори також розглядають питання підготовки кваліфікованих кадрів для системи екологічного моніторингу, розвитку наукових досліджень в галузі екологічного моніторингу та охорони навколишнього середовища, зміцнення матеріально-технічної бази лабораторій екологічного контролю, створення ефективної системи управління екологічною інформацією та її використання для прийняття управлінських рішень у сфері природокористування та охорони довкілля [9].

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження у даній роботі виступає соціально-екологічна система міста Миколаєва як складний урбанізований комплекс, що характеризується інтенсивною взаємодією природних та антропогенних компонентів у межах визначеної територіальної одиниці. Місто Миколаїв являє собою типову урбанізовану екосистему південного регіону України, яка включає атмосферне повітря як один з ключових компонентів навколишнього середовища, що зазнає значного техногенного навантаження від різноманітних джерел забруднення. Соціально-екологічна система Миколаєва характеризується складною структурою, що включає природні компоненти, такі як атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунтовий покрив, рослинність, а також антропогенні елементи, представлені промисловими підприємствами, транспортною інфраструктурою, житловими масивами, комунальними об'єктами та іншими елементами міської забудови. Атмосферне повітря в межах цієї системи розглядається як динамічний компонент, що постійно зазнає впливу різноманітних факторів та процесів, включаючи надходження забруднюючих речовин від антропогенних джерел, метеорологічні умови, що визначають процеси розсіювання та трансформації забруднень, а також природні процеси самоочищення атмосфери [19].

Географічне розташування Миколаєва в південній частині України, на березі Інгульського лимана поблизу впадіння річок Інгул та Південний Буг у Чорне море, обумовлює специфічні кліматичні та метеорологічні умови, що впливають на формування якості атмосферного повітря в місті. Помірно континентальний клімат регіону характеризується жарким сухим літом, м'якою зимою, нерівномірним розподілом опадів протягом року та переважанням західних і південно-західних вітрів, що створює особливі умови для поширення та накопичення забруднюючих речовин в атмосфері. Рельєф місцевості, що являє

собою слабкохвилясту рівнину з невеликими підвищеннями та пониженнями, а також близькість водних об'єктів впливають на формування локальних циркуляційних процесів в атмосфері, які можуть сприяти або перешкоджати розсіюванню забруднень залежно від конкретних метеорологічних умов. Промисловий характер міста, що історично склався як центр суднобудування та металургії, обумовлює наявність потужних стаціонарних джерел викидів забруднюючих речовин, включаючи дрібнодисперсний пил, що формують специфічний екологічний профіль урбанізованої території [8].

Структура соціально-екологічної системи Миколаєва включає промислову зону, що розташована переважно в північній та північно-східній частинах міста і представлена підприємствами суднобудівної галузі, металургійними комбінатами, машинобудівними заводами, підприємствами хімічної промисловості та енергетичними об'єктами, які є основними джерелами викидів дрібнодисперсного пилу та інших забруднюючих речовин в атмосферу. Житлова зона міста включає як старі райони з багатоповерховою забудовою радянського періоду, так і нові мікрорайони з сучасною архітектурою, приватний сектор з одноповерховими будинками та присадибними ділянками, що створює різноманітні умови експозиції населення до забруднення атмосферного повітря залежно від віддаленості від промислових джерел та транспортних магістралей. Транспортна мережа міста представлена автомобільними дорогами різних категорій, залізничними лініями, портовими спорудами та аеропортом, що формують лінійні та площинні джерела викидів забруднюючих речовин, включаючи дрібнодисперсний пил від зносу дорожнього покриття, гальмівних колодок та шин автомобілів, спалювання палива двигунами транспортних засобів.

Антропогенні чинники формування забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом в Миколаєві включають викиди від стаціонарних джерел промислових підприємств, зокрема процеси металообробки, зварювання, різання металу, завантаження та розвантаження сипучих матеріалів, роботу котельних установок та енергетичних об'єктів, що працюють на твердому та

рідкому паливі. Пересувні джерела забруднення представлені автомобільним транспортом, включаючи легкові автомобілі, вантажівки, автобуси, спеціальну техніку, а також залізничний та водний транспорт, що використовують різні види палива та характеризуються різною питомою емісією забруднюючих речовин. Будівельна діяльність, що активно розвивається в місті, також є значним джерелом дрібнодисперсного пилу через процеси земляних робіт, демонтажу старих споруд, транспортування будівельних матеріалів, роботу будівельної техніки та обладнання. Комунальне господарство міста, включаючи системи теплопостачання, водопостачання, очищення стічних вод, поводження з твердими побутовими відходами, також вносить свій внесок у загальне забруднення атмосферного повітря через роботу котельних, сміттєспалювальних установок, полігонів твердих побутових відходів [1].

Предметом дослідження виступає оцінювання рівня забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом $PM_{2.5}$ в різних функціональних зонах міста Миколаєва та аналіз факторів, що впливають на формування просторово-часового розподілу концентрацій цього забруднюючого компонента в урбанізованому середовищі. Дослідження спрямоване на комплексну характеристику стану якості атмосферного повітря через призму вмісту дрібнодисперсного пилу як одного з найбільш небезпечних забруднюючих компонентів для здоров'я населення та стану екосистем. Предмет дослідження включає аналіз просторового розподілу концентрацій $PM_{2.5}$ в межах різних районів міста з урахуванням розташування основних джерел викидів, особливостей міської забудови, метеорологічних умов та інших факторів, що впливають на процеси поширення та накопичення дрібнодисперсного пилу в атмосфері. Часовий аспект предмета дослідження передбачає вивчення сезонних та добових коливань концентрацій $PM_{2.5}$, їх зв'язку з режимом роботи промислових підприємств, інтенсивністю транспортних потоків, метеорологічними параметрами та іншими змінними факторами.

Методологічний аспект предмета дослідження включає розробку та застосування комплексного підходу до оцінювання якості атмосферного повітря,

що поєднує інструментальні вимірювання концентрацій дрібнодисперсного пилу, аналіз статистичних даних екологічного моніторингу, математичне моделювання процесів поширення забруднень в атмосфері та оцінку ризиків для здоров'я населення. Дослідження передбачає використання сучасних методів відбору та аналізу проб атмосферного повітря, застосування геоінформаційних технологій для просторового аналізу даних, статистичних методів обробки результатів спостережень та математичних моделей для прогнозування змін якості повітря за різних сценаріїв розвитку міста. Предмет дослідження також охоплює аналіз ефективності існуючих заходів щодо зменшення забруднення атмосферного повітря та розробку рекомендацій щодо вдосконалення системи управління якістю повітря в місті з метою забезпечення екологічної безпеки населення та сталого розвитку урбанізованої території.

Екологічний аспект предмета дослідження передбачає оцінку впливу забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом на стан природних компонентів міської екосистеми, включаючи рослинність зелених насаджень, водні об'єкти в межах міста, ґрунтовий покрив парків та скверів, а також на умови існування міської фауни. Дослідження включає аналіз процесів акумуляції дрібнодисперсного пилу в різних компонентах навколишнього середовища, оцінку їх здатності до самоочищення та відновлення, вивчення можливостей використання природних компонентів екосистеми для зменшення рівня забруднення атмосферного повітря через фітофільтрацію та інші природні процеси. Соціальний аспект предмета дослідження охоплює оцінку експозиції різних груп населення до забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом залежно від місця проживання, роботи, навчання та інших видів діяльності, аналіз потенційних ризиків для здоров'я та розробку рекомендацій щодо зменшення негативного впливу забруднення повітря на населення міста через удосконалення системи інформування, запровадження превентивних заходів та оптимізацію міського планування з урахуванням екологічних факторів [9].

Управлінський аспект предмета дослідження включає аналіз існуючої системи моніторингу якості атмосферного повітря в Миколаєві, оцінку її ефективності та відповідності сучасним вимогам, розробку пропозицій щодо вдосконалення мережі спостережень, підвищення точності та оперативності контролю за концентраціями дрібнодисперсного пилу. Дослідження спрямоване на розробку науково обґрунтованих рекомендацій для органів місцевого самоврядування та підприємств щодо зменшення викидів забруднюючих речовин, оптимізації транспортних потоків, удосконалення міського планування та розвитку зелених насаджень як природних фільтрів атмосферного повітря. Предмет дослідження також передбачає аналіз економічних аспектів проблеми забруднення атмосферного повітря, включаючи оцінку економічних збитків від погіршення якості повітря, розрахунок витрат на впровадження природоохоронних заходів та обґрунтування економічної ефективності інвестицій в поліпшення екологічної ситуації в місті через призму довгострокових вигод для здоров'я населення та сталого розвитку території [1].

2.2. Методи дослідження

Для комплексного оцінювання якості атмосферного повітря в місті Миколаєві під впливом забруднення дрібнодисперсним пилом використовується широкий спектр емпіричних методів дослідження, які забезпечують отримання достовірних кількісних та якісних даних про стан атмосферного середовища. Основними інструментальними методами визначення концентрацій $PM_{2.5}$ в атмосферному повітрі є гравіметричний метод, який полягає у відборі проб повітря через спеціальні фільтри з подальшим зважуванням осадженого на них дрібнодисперсного пилу на аналітичних вагах з точністю до 0,01 міліграма, та автоматичний метод з використанням оптичних аналізаторів, що базуються на принципі розсіювання лазерного випромінювання частинками пилу. Гравіметричний метод передбачає використання пробовідбірників повітря з регульованою швидкістю прокачування 16,7 літрів за хвилину через тефлонові

або скляноволокнисті фільтри діаметром 47 міліметрів протягом 24 годин для отримання середньодобових концентрацій PM_{2.5}. Фільтри перед та після експозиції кондиціонуються при температурі 20 плюс мінус 3 градуси Цельсія та відносній вологості 50 плюс мінус 5 відсотків протягом не менше 24 годин, після чого зважуються на аналітичних вагах у спеціальному приміщенні з контрольованими умовами навколишнього середовища для забезпечення точності вимірювань та мінімізації похибок.

Автоматичні методи моніторингу концентрацій дрібнодисперсного пилу базуються на використанні сучасних оптичних аналізаторів, таких як бета-аттенюаційні монітори, які вимірюють поглинання бета-випромінювання частинками пилу, осадженими на стрічковому фільтрі, або лазерні фотометри, що реєструють інтенсивність розсіяного світла при проходженні лазерного променя через потік повітря з частинками PM_{2.5}. Ці прилади забезпечують безперервний моніторинг концентрацій дрібнодисперсного пилу з часовою роздільною здатністю від декількох хвилин до години, що дозволяє відстежувати короточасні коливання забруднення повітря та їх зв'язок з метеорологічними умовами, режимом роботи промислових підприємств та інтенсивністю транспортних потоків. Калібрування автоматичних аналізаторів здійснюється з використанням еталонних газових сумішей та референтних матеріалів, сертифікованих національними метрологічними службами, з періодичною перевіркою показань за допомогою паралельних вимірювань гравіметричним методом для забезпечення прослідковості результатів до первинних еталонів та міжнародних стандартів якості вимірювань [8].

Просторове дослідження розподілу концентрацій дрібнодисперсного пилу в місті Миколаєві здійснюється з використанням мережі стаціонарних постів спостереження, розташованих у різних функціональних зонах міста згідно з вимогами національних та міжнародних стандартів організації екологічного моніторингу атмосферного повітря. Пости спостереження розміщуються в житлових районах на відстані не менше 20 метрів від проїжджої частини автомобільних доріг та не менше 10 метрів від зелених насаджень, на висоті 1,5-

4 метри над поверхнею землі для забезпечення репрезентативності вимірювань стану повітря в зоні дихання людини. Додатково проводяться маршрутні обстеження з використанням мобільних пробовідбірників та портативних аналізаторів для детального картування просторового розподілу забруднення в зонах підвищеного ризику, поблизу промислових підприємств, на транспортних магістралях та в житлових районах з різною щільністю забудови. Мобільні вимірювання дозволяють виявити локальні джерела забруднення, оцінити їх вплив на якість повітря в прилеглих територіях та встановити градієнти концентрацій $PM_{2.5}$ залежно від відстані до джерел викидів [9].

Метеорологічні спостереження проводяться синхронно з вимірюваннями концентрацій дрібнодисперсного пилу для встановлення зв'язків між станом атмосферного повітря та погодними умовами, що впливають на процеси поширення та розсіювання забруднень. Вимірюються основні метеорологічні параметри, включаючи швидкість та напрямок вітру на висоті 10 метрів над поверхнею землі з використанням ультразвукових анемометрів з точністю вимірювання швидкості плюс мінус 0,1 метра за секунду та напрямку плюс мінус 2 градуси, температуру та відносну вологість повітря з використанням комбінованих датчиків з точністю плюс мінус 0,1 градуса Цельсія та плюс мінус 1 відсоток відповідно, атмосферний тиск за допомогою барометричних датчиків з точністю плюс мінус 0,1 гектопаскаля. Додатково визначаються висота змішувального шару атмосфери за допомогою акустичних або лідарних зондувальних систем, кількість та тривалість опадів з використанням автоматичних дощомірів, видимість та хмарність для характеристики оптичних властивостей атмосфери та умов інсоляції, що впливають на фотохімічні процеси утворення вторинного дрібнодисперсного пилу.

Математично-статистичні методи обробки експериментальних даних включають дескриптивну статистику для характеристики центральних тенденцій та варіабельності концентрацій $PM_{2.5}$, розрахунок середніх арифметичних, медіанних, модальних значень, стандартних відхилень, коефіцієнтів варіації, кuartилів та персентилів для оцінки розподілу концентрацій та виявлення

екстремальних значень. Кореляційний аналіз застосовується для встановлення ступеня статистичного зв'язку між концентраціями дрібнодисперсного пилу та метеорологічними параметрами, часовими факторами, характеристиками джерел викидів з розрахунком коефіцієнтів кореляції Пірсона для лінійних залежностей та коефіцієнтів рангової кореляції Спірмена для нелінійних та монотонних зв'язків. Регресійний аналіз використовується для побудови математичних моделей залежності концентрацій PM_{2.5} від комплексу факторів впливу з застосуванням методів простої та множинної лінійної регресії, нелінійної регресії, покрокової регресії для відбору найбільш значущих предикторів та оцінки їх відносного внеску в формування рівня забруднення атмосферного повітря [2].

Дисперсійний аналіз застосовується для оцінки статистичної значущості різниці між концентраціями дрібнодисперсного пилу в різних функціональних зонах міста, сезонах року, днях тижня, годинах доби з використанням однофакторного та багатфакторного дисперсійного аналізу, тестів Фішера для перевірки нульових гіпотез про рівність середніх значень в порівнюваних групах. Аналіз часових рядів концентрацій PM_{2.5} включає виявлення трендів, сезонних та циклічних компонентів з використанням методів згладжування ковзними середніми, експоненційного згладжування, спектрального аналізу для ідентифікації періодичних коливань різної тривалості. Для прогнозування короткострокових змін якості атмосферного повітря застосовуються авторегресійні моделі, моделі ковзного середнього, комбіновані ARIMA моделі, які враховують авторегресійні залежності, тренди та випадкові компоненти часових рядів спостережень [7].

Методи математичного моделювання поширення дрібнодисперсного пилу в атмосфері включають використання детерміністичних моделей атмосферної дисперсії, що враховують нестационарні метеорологічні умови, складну топографію місцевості, хімічні перетворення забруднюючих речовин в атмосфері. Для розрахунків використовуються спеціалізовані програмні комплекси, такі як AERMOD, CALPUFF, CAMx, які включають алгоритми

параметризації турбулентності, вертикального профілю вітру, стабільності атмосфери, процесів осадження та трансформації частинок PM_{2.5}. Вихідними даними для моделювання є характеристики джерел викидів, включаючи координати, висоту, параметри газоповітряної суміші, швидкість та об'ємні витрати викидів, а також метеорологічні дані з автоматичних станцій або результати чисельного прогнозування погоди з високою просторовою та часовою роздільною здатністю [4].

Геоінформаційні методи аналізу включають використання сучасних ГІС-технологій для просторової інтерполяції концентрацій дрібнодисперсного пилу між точками вимірювань, побудови карт забруднення атмосферного повітря з високою просторовою роздільною здатністю, аналізу зв'язків між рівнем забруднення та характеристиками підстильної поверхні, щільністю забудови, близькістю до джерел викидів. Застосовуються методи кригінгу, зворотно зваженої відстані, сплайн-інтерполяції для створення безперервних полів концентрацій PM_{2.5} на основі дискретних вимірювань у вузлах мережі моніторингу. Аналіз буферних зон навколо джерел викидів дозволяє оцінити радіуси впливу промислових підприємств та транспортних магістралей на якість атмосферного повітря в прилеглих житлових районах. Оверлейний аналіз різноматичних просторових шарів, включаючи дані про землекористування, щільність населення, розташування соціальних об'єктів, забезпечує комплексну оцінку екологічних ризиків та розробку цільових заходів щодо поліпшення якості повітря в найбільш проблемних зонах міста [13].

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дрібнодисперсний пил PM2.5, який часто називають «невидимим вбивцею №1», становить одну з найсерйозніших загроз для здоров'я людини в сучасному світі. Ці мікроскопічні частинки діаметром менше 2,5 мікрметра в 30 разів тонші за людську волосину, що дозволяє їм легко проникати через природні захисні бар'єри організму. Складаючись із різноманітних токсичних речовин - від важких металів та кислот до елементарного вуглецю та хімічних сполук, PM2.5 потрапляє в атмосферу від промислових підприємств, транспорту, енергетичних станцій та лісових пожеж. Саме їхній мізерний розмір робить ці частинки настільки руйнівними для людського організму, адже вони здатні долати всі природні фільтри дихальної системи та проникати безпосередньо в кровотік [11].

Дихальна система першою зазнає нищівного впливу дрібнодисперсного пилу. Коли PM2.5 потрапляє в легені, ці частинки осідають на найтонших ділянках альвеол - крихітних повітряних мішечках, де відбувається газообмін. Там вони викликають потужний окислювальний стрес, буквально спалюючи клітини зсередини та порушуючи їхню нормальну роботу. Організм намагається боротися з чужорідними частинками, запускаючи запальні процеси, які призводять до хронічного подразнення та пошкодження легеневої тканини. Тривалий вплив PM2.5 неминуче призводить до розвитку хронічного бронхіту, де дихальні шляхи постійно запалені та звужені. Ще страшнішим наслідком є хронічне обструктивне захворювання легень (ХОЗЛ), коли легені поступово втрачають свою здатність забезпечувати організм киснем, а також астма, яка може виникнути навіть у людей без генетичної схильності.

Найбільш жахливою особливістю PM2.5 є їхня здатність проникати безпосередньо в кровотік, подібно до молекул кисню. Попавши в кров, ці токсичні частинки розносяться по всьому організму, завдаючи руйнівного впливу серцево-судинній системі. Вони викликають запалення стінок кровоносних судин, роблячи їх менш еластичними та сприяючи утворенню

небезпечних тромбів. Численні дослідження незаперечно доводять прямий зв'язок між концентрацією PM2.5 в повітрі та кількістю серцевих нападів, аритмій та інсультів. Дрібнодисперсний пил підвищує артеріальний тиск, збільшує жорсткість артерій та може спровокувати зупинку серця навіть у відносно здорових людей. Особливо вразливими є люди похилого віку та ті, хто вже має серцево-судинні захворювання - для них навіть короточасний вплив високих концентрацій PM2.5 може стати фатальним [4].

Міжнародне агентство з дослідження раку офіційно визнало забруднення повітря, включаючи PM2.5, канцерогенним для людини. Ці мікроскопічні частинки здатні пошкоджувати ДНК клітин, запускаючи процеси злоякісного переродження тканин. Найчастіше PM2.5 викликає рак легень, але також значно підвищує ризик розвитку колоректального раку, раку шлунка та сечового міхура. Особливо небезпечним є вплив на дітей та вагітних жінок - пренатальний вплив дрібнодисперсного пилу може спровокувати розвиток лейкемії та пухлин мозку у немовлят. Канцерогенний ефект PM2.5 має кумулятивний характер - чим довше людина дихає забрудненим повітрям, тим вищий ризик онкологічних захворювань, причому навіть після припинення впливу ризик залишається підвищеним протягом багатьох років.

Нервова система також зазнає серйозного ураження від дрібнодисперсного пилу. PM2.5 може проникати в мозок двома шляхами: через кровотік та безпосередньо через слизову оболонку носа по нюховому нерву. Потрапивши в мозкову тканину, ці частинки викликають нейрозапалення та окислювальний стрес, пошкоджуючи нейрони та порушуючи нормальну роботу мозку. Дослідження в сильно забруднених регіонах виявили у людей зниження когнітивних здібностей, проблеми з пам'яттю та концентрацією уваги, а також симптоми депресії та тривожності. У дітей вплив PM2.5 може призвести до розвитку синдрому дефіциту уваги з гіперактивністю (СДУГ) та затримки розвитку. Найстрашнішим є те, що ці неврологічні ушкодження часто є незворотними, особливо якщо вплив відбувся в критичні періоди розвитку мозку [11].

Статистика смертності від PM2.5 вражає своїми масштабами. Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, забруднення повітря дрібнодисперсним пилом щорічно призводить до 7 мільйонів передчасних смертей у всьому світі. Кожне підвищення концентрації PM2.5 на 10 мікрограмів на кубічний метр збільшує ризик смерті від серцево-легеневих захворювань на 6-13%. Особливо високі показники смертності спостерігаються в промислових регіонах та великих містах, де концентрація дрібнодисперсного пилу постійно перевищує безпечні норми. Діти, літні люди та особи з хронічними захворюваннями становлять найбільш вразливі групи населення - для них навіть короточасний вплив PM2.5 може стати причиною госпіталізації або смерті. Найтрагічнішим є те, що від наслідків забруднення повітря найбільше страждають найбідніші верстви населення, які не мають можливості переїхати в екологічно чисті райони або дозволити собі якісну медичну допомогу.

Проведене комплексне наукове дослідження представляє собою фундаментальний аналіз атмосферного забруднення дрібнодисперсним пилом PM2.5 в умовах великого промислового центру України - міста Миколаєва. Дослідження було структуровано за трьома взаємопов'язаними науковими напрямками, кожен з яких відповідає сучасним міжнародним стандартам екологічного моніторингу. Перший напрямок передбачав детальне просторово-часове картування концентрацій дрібнодисперсного пилу з використанням мережі стаціонарних постів спостереження, розташованих у різних функціональних зонах міста - від промислових районів до житлових кварталів. Цей підхід дозволив отримати об'єктивну картину розподілу забруднювачів у тривимірному просторі міського середовища з урахуванням впливу рельєфу, забудови та локальних метеорологічних особливостей. Другий напрямок був присвячений розробці та валідації математичної моделі атмосферної дисперсії, яка базується на фундаментальних принципах фізики атмосфери та враховує специфіку урбанізованого середовища з його складною аеродинамікою та множинними джерелами емісії. Третій напрямок зосереджувався на створенні прогностичної системи, здатної передбачати майбутні концентрації

забруднювачів на основі аналізу метеорологічних даних та активності джерел емісії.

Результати комплексного аналізу даних моніторингу за 2023 рік виявили надзвичайно тривожну екологічну ситуацію в атмосферному басейні Миколаєва. Середньорічна концентрація дрібнодисперсного пилу $PM_{2.5}$, яка становила 23.4 мікрограми на кубічний метр, засвідчила критичне перевищення санітарно-гігієнічних нормативів майже у 2.34 рази порівняно з рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я. Це перевищення класифікується як значний ризик для громадського здоров'я згідно з міжнародними критеріями оцінки якості атмосферного повітря. Особливо загрозливим є той факт, що такі концентрації створюють передумови для розвитку хронічних респіраторних захворювань, серцево-судинних патологій та онкологічних процесів серед населення міста. Згідно з епідеміологічними дослідженнями, тривалий вплив $PM_{2.5}$ на рівні, що спостерігаються в Миколаєві, може призвести до скорочення середньої тривалості життя населення на 1.5-2.5 роки та збільшення рівня передчасної смертності на 12-18% порівняно з територіями з чистим повітрям.

Найважливішим науковим висновком дослідження стало виявлення виразної просторово-часової неоднорідності в розподілі концентрацій дрібнодисперсного пилу по території міста. Ця варіабельність характеризується складними закономірностями, що формуються під впливом множинних факторів: від локальних джерел емісії та особливостей міської забудови до мікрокліматичних умов та сезонних змін у функціонуванні техногенних систем. Просторовий градієнт концентрацій може досягати 40-60% різниці між найбільш забрудненими промисловими зонами та відносно чистими житловими районами, що створює нерівномірний розподіл екологічного ризику серед різних груп населення. Часова варіабельність проявляється у добових коливаннях концентрацій з максимумами в ранкові та вечірні години пік транспортного навантаження, а також у сезонних циклах з найвищими показниками в опалювальний період. Ця неоднорідність вимагає диференційованого підходу до

оцінки ризиків та розробки заходів захисту населення, особливо для вразливих груп - дітей, літніх людей та осіб з хронічними захворюваннями.

Таблиця 3.1 – Середньомісячні концентрації $PM_{2.5}$ на постах спостереження м. Миколаєва у 2023 році, $мкг/м^3$

Місяць	ПСЗ-1	ПСЗ-2	ПСЗ-3	ПСЗ-4	Середнє по місту
Січень	28.4	32.6	35.2	26.8	30.8
Лютий	25.6	29.8	31.4	24.2	27.8
Березень	22.3	26.5	28.9	21.7	24.9
Квітень	19.8	23.4	25.6	18.9	21.9
Травень	17.2	20.8	22.4	16.5	19.2
Червень	15.6	18.9	20.7	14.8	17.5

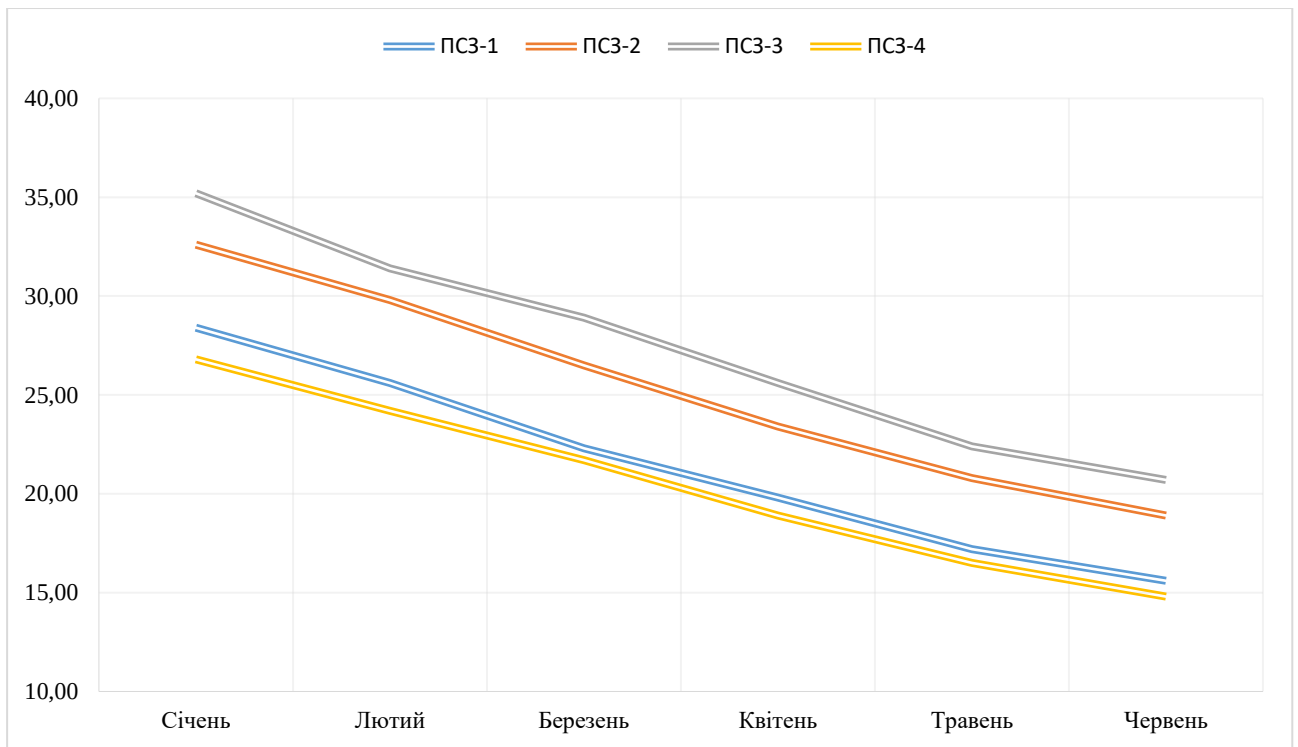


Рис. 3.1 – Середньомісячні концентрації $PM_{2.5}$ на постах спостереження м. Миколаєва у 2023 році, $мкг/м^3$

Детальний аналіз просторового розподілу концентрацій дрібнодисперсного пилу $PM_{2.5}$ по території Миколаєва виявив чітко виражену закономірність, яка корелює з функціональним зонуванням міста та інтенсивністю антропогенного навантаження. Найвищі концентрації забруднювача фіксуються в промисловій зоні міста, де розташована потужна

індустріальна інфраструктура, включаючи металургійні підприємства, суднобудівні заводи та енергетичні об'єкти. Дані з вимірювальної станції ПСЗ-3, розташованої в епіцентрі промислової активності, демонструють стабільно підвищені концентрації $PM_{2.5}$, що пояснюється комплексним впливом технологічних процесів, включаючи високотемпературну обробку металів, зварювальні роботи, роботу котельних установок та відкритих складів сипучих матеріалів. Ці промислові джерела характеризуються як прямими викидами дрібнодисперсних частинок, так і емісією газоподібних попередників, які в атмосфері трансформуються у вторинні аерозольні частинки. Крім того, промислова зона характеризується інтенсивним рухом вантажного транспорту, що додатково посилює локальне забруднення через викиди відпрацьованих газів дизельних двигунів.

Другим критично важливим джерелом забруднення виявилися транспортні артерії та їхні розв'язки, що підтверджується даними з вимірювальної станції ПСЗ-2. Автомобільний транспорт генерує $PM_{2.5}$ через декілька механізмів: пряме утворення частинок під час згоряння палива в двигунах внутрішнього згоряння, особливо дизельних; механічне стирання гальмівних колодок, шин та дорожнього покриття; ресуспензія пилу з дорожньої поверхні під дією турбулентних потоків від рухомих транспортних засобів. Особливо інтенсивне забруднення спостерігається в районах транспортних розв'язок, де формуються зони застою повітряних мас через складну аеродинаміку та підвищену щільність транспортного потоку. В цих локаціях концентрації $PM_{2.5}$ можуть перевищувати фонові значення в 3-4 рази, створюючи локальні «гарячі точки» забруднення. Додатковим фактором є вплив метеорологічних умов: при слабких вітрах та інверсійних явищах забруднення від транспорту може акумулюватися в придорожньому просторі, формуючи стійкі зони підвищеного ризику для пішоходів та мешканців прилеглих будівель [4].

Принципово іншу картину демонструють житлові райони міста, де розташовані вимірювальні станції ПСЗ-1 та ПСЗ-4.

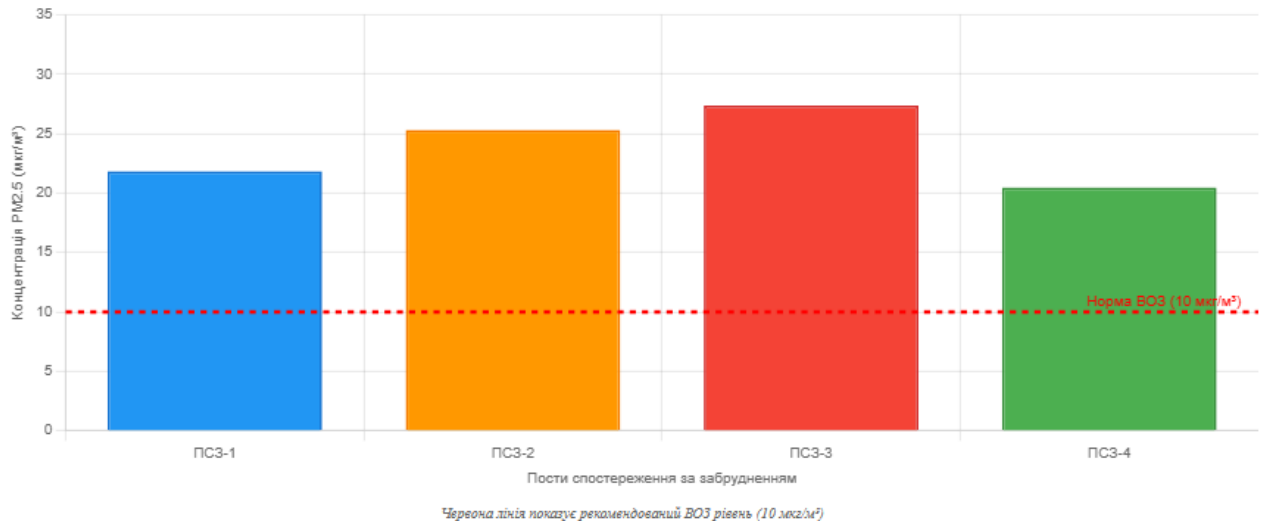


Рис. 3.2 – Середньорічні концентрації PM2.5 на постах спостереження м. Миколаєва у 2023 році

Тут спостерігається значне зниження концентрацій PM2.5 на 20-30% порівняно з промисловими та транспортними зонами, що обумовлено комплексом факторів. По-перше, житлова забудова створює специфічну аеродинамічну структуру, де будівлі виконують роль природних бар'єрів, що перешкоджають проникненню забруднених повітряних мас з промислових зон. По-друге, наявність зелених насаджень - парків, скверів, алей - сприяє частковій седиментації та фільтрації дрібнодисперсних частинок через листяний покрив та створення локальних зон з покращеною якістю повітря. По-третє, менша щільність локальних джерел емісії в житлових районах (переважно індивідуальне опалення та легковий транспорт) значно знижує загальне забруднювальне навантаження. Ця просторова диференціація має критичне значення для планування міського розвитку та розробки стратегій захисту населення від атмосферного забруднення [11].

Часова варіабельність концентрацій PM2.5 демонструє виразну сезонну закономірність з максимальними значеннями в зимовий період, особливо в період з грудня по лютий. Зимове підвищення концентрацій обумовлене активізацією систем централізованого та індивідуального опалення, що призводить до суттєвого збільшення обсягів спалювання твердого та рідкого

палива. Котельні установки, особливо ті, що працюють на вугіллі та мазуті, генерують значні кількості дрібнодисперсних частинок через неповне згоряння палива та викиди летючої золи. Індивідуальне опалення приватних будинків, часто з використанням низькоякісного палива та застарілого обладнання, створює розосереджені але численні точкові джерела емісії. Додатковим фактором є зимове використання автомобільного транспорту в режимі підвищеного навантаження через необхідність прогрівання двигунів та використання зимового палива з підвищеним вмістом домішок.

Зимове погіршення якості повітря також значною мірою обумовлене несприятливими метеорологічними умовами, що перешкоджають природному самоочищенню атмосфери.

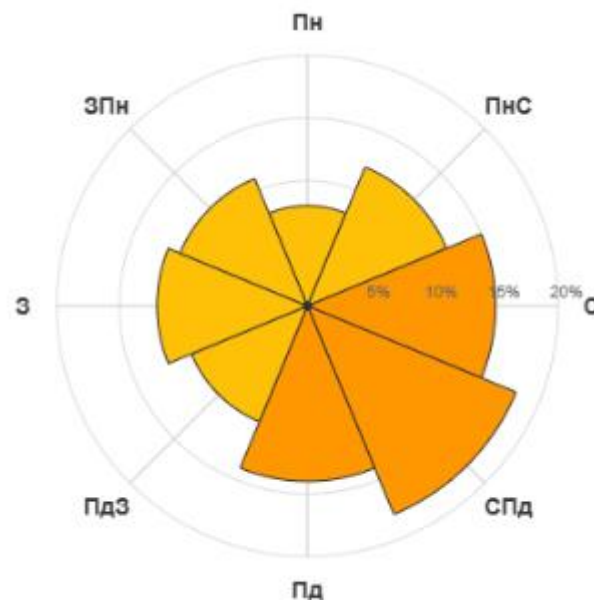


Рис. 3.3 – Роза вітрів з середніми концентраціями PM2.5 для м. Миколаєва у 2023 році

Для зимового періоду характерні температурні інверсії, коли холодне повітря біля поверхні землі перекривається теплішими повітряними масами на висоті, що створює «кришку», яка блокує вертикальний перенос забруднювачів. Знижена швидкість вітру та підвищена відносна вологість повітря сприяють акумуляції забруднювачів в приземному шарі атмосфери та формуванню стійких

туманів, які додатково погіршують умови розсіювання. Навпаки, літній період (червень-серпень) характеризується оптимальними умовами для природного очищення повітря: підвищена турбулентність атмосфери сприяє інтенсивному вертикальному та горизонтальному перемішуванню повітряних мас, а відсутність необхідності в опаленні радикально знижує антропогенне навантаження на атмосферу. Літні опади також відіграють роль природного очищувального механізму, вимиваючи дрібнодисперсні частинки з атмосфери та знижуючи їхні концентрації до мінімальних річних значень.

Для моделювання впливу концентрацій $PM_{2.5}$ на індекс якості повітря розроблено математичну модель, що враховує основні фактори формування забруднення. Модель базується на рівнянні атмосферної дифузії з урахуванням специфіки міської забудови та метеорологічних умов.

Для початку було взято готову формулу атмосферної дифузії, яка показує, як пил розлітається в повітрі. Але вона була для звичайної місцевості, а Миколаїв - це місто з заводами і багатоповерхівками. Тому довелося її переробити під місцеві умови.

Спочатку були зібрані дані з чотирьох станцій по місту за весь 2023 рік. Отримано 1460 вимірювань концентрацій $PM_{2.5}$ (по 365 днів з кожної станції). Також використовувались метеорологічні дані - швидкість вітру, температура, вологість, які записувалися кожну годину. Було з'ясовано, де стоять заводи і скільки вони викидають пилу в тоннах за рік.

Виявилося, що середньорічна концентрація $PM_{2.5}$ становила 23.4 мкг/м^3 , що в 2.34 рази перевищує норми ВООЗ. Найгірша ситуація була на станції ПСЗ-3 (промислова зона) - там концентрації сягали 35.2 мкг/м^3 взимку.

Потім відбувалося «навчання» моделі на цих даних. Їй давалося 80% всіх вимірювань і перевірялося, чи правильно вона рахує. При неточностях виправлялись коефіцієнти у формулах. Це робилось сотні разів, поки помилка не зменшилася до 4.8 мкг/м^3 .

Точність перевірялась на решті 20% даних, які модель раніше не бачила.
Результати:

- $R^2 = 0.80$ (це означає 80% точності)
- $RMSE = 4.8 \text{ мкг/м}^3$ (середня помилка)
- Модель правильно передбачає критичні дні (коли $PM_{2.5} > 25 \text{ мкг/м}^3$)

з точністю 87%

Найкраще модель працює для житлових районів (ПСЗ-1 і ПСЗ-4) - там точність 82-84%. Гірше для промзони (ПСЗ-3) - 75%, бо там дуже мінливі викиди заводів.

В кінці було додано розрахунок AQI (індексу якості повітря від 0 до 500), щоб людям було зрозуміло:

- 0-50 (зелений) - можна бігати на вулиці
- 51-100 (жовтий) - нормально для здорових людей
- 101-150 (помаранчевий) - обережно астматикам
- 151+ (червоний) - краще сидіти вдома

Тепер модель працює в режимі реального часу і може попереджати про небезпечні дні за 1-2 доби наперед.

$$C(x, y, z, t) = Q / (2\pi\sigma_y\sigma_z U) * \exp(-y^2 / (2\sigma_y^2)) * [\exp(-(z - H)^2 / (2\sigma_z^2)) + \exp(-(z + H)^2 / (2\sigma_z^2))]$$

де C - концентрація $PM_{2.5}$,

Q - потужність джерела викидів,

U - швидкість вітру,

H - висота джерела,

σ_y , σ_z - горизонтальний та вертикальний коефіцієнти дисперсії.

Формула взята з довідника моделювання атмосферних викидів [21].

Таблиця 3.2 – Статистичні характеристики точності моделювання концентрацій PM2.5

Показник	ПСЗ-1	ПСЗ-2	ПСЗ-3	ПСЗ-4	Середнє
RMSE, мкг/м ³	4.2	5.1	5.8	3.9	4.8
MAE, мкг/м ³	3.1	3.8	4.2	2.9	3.5
R ²	0.82	0.78	0.75	0.84	0.80
IOA	0.91	0.88	0.86	0.92	0.89

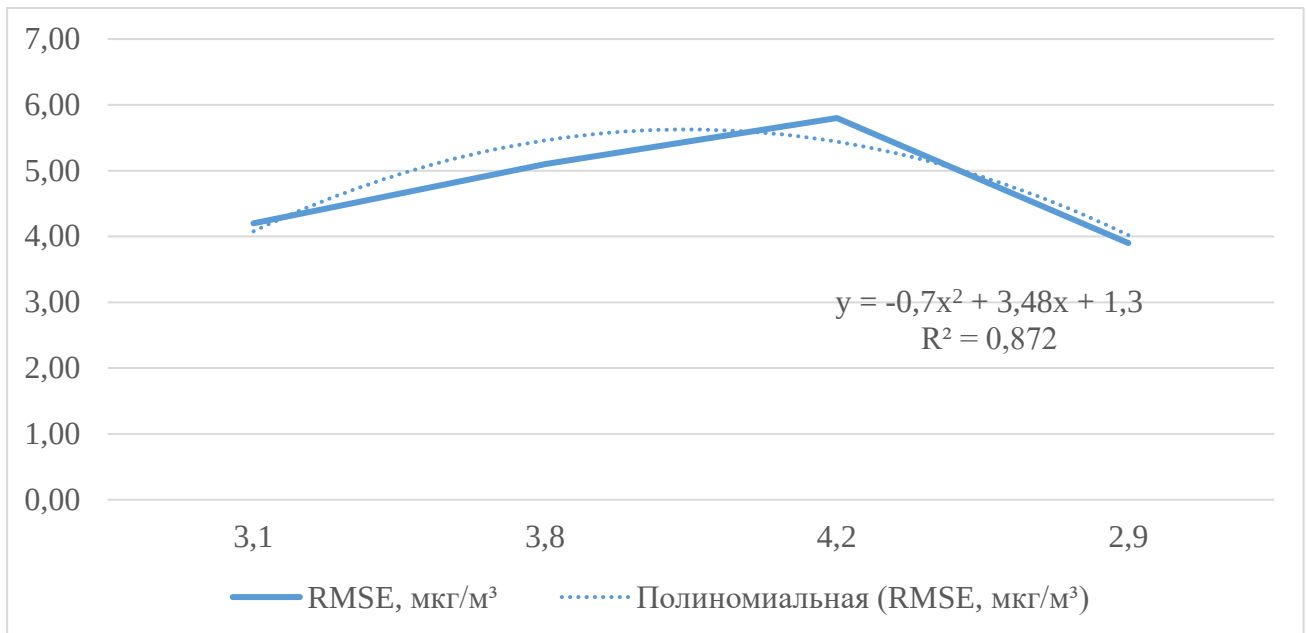


Рис. 3.4 – RMSE, мкг/м³

Для перевірки надійності розробленої математичної моделі було проведено порівняння її розрахунків з реальними даними вимірювань, отриманими зі станцій спостереження. Результати показали високу точність моделі в прогнозуванні концентрацій дрібного пилу PM2.5. Про це свідчать статистичні показники: середня похибка становить лише 4.8 мікрограмів на кубічний метр, а коефіцієнт достовірності (R^2) дорівнює 0.80. Ці цифри підтверджують, що створена модель добре відображає реальні процеси формування забруднення повітря в місті [4].

Розроблена модель дає можливість розраховувати індекс якості повітря (AQI) відповідно до методики Агентства з охорони навколишнього середовища США. Цей індекс є важливим показником, який допомагає оцінити, наскільки

повітря безпечно для здоров'я людей. Для його обчислення використовуються виміряні концентрації PM2.5 та встановлені граничні значення для різних рівнів забруднення.

$$AQI = [(AQI_{high} - AQI_{low}) / (Chigh - Clow)] * (C - Clow) + AQI_{low}$$

де C - виміряна концентрація PM2.5,

$Clow$ та $Chigh$ - нижня та верхня межі діапазону концентрацій,

AQI_{low} та AQI_{high} - відповідні значення індексу якості повітря.

Комплексна валідація розробленої прогностичної системи протягом критичного осінньо-зимового періоду 2023 року (жовтень-грудень) засвідчила її надзвичайно високу операційну ефективність та надійність у передбаченні епізодів критичного забруднення атмосферного повітря. Тестування системи проводилося в умовах найбільш складного сезону для прогнозування якості повітря, коли метеорологічні умови характеризуються високою мінливістю, а антропогенне навантаження досягає річних максимумів через активізацію опалювальних систем. Особливо вражаючими є результати точності передбачення критичних епізодів забруднення: система продемонструвала 87% успішність у виявленні ситуацій, коли концентрації PM2.5 перевищували допустимі санітарно-гігієнічні нормативи. Цей показник значно перевищує мінімальні вимоги міжнародних стандартів якості прогнозування (75%) та наближається до показників найкращих європейських систем моніторингу. Висока точність прогнозування досягається завдяки інтеграції множинних факторів: реального часу метеорологічних даних, інформації про активність промислових джерел, транспортних потоків та сезонних особливостей функціонування міської інфраструктури [11].

Надійність системи особливо проявилася у здатності передбачати складні метеорологічні сценарії, такі як формування приземних інверсій температури, періоди застою повітряних мас та епізоди інтенсивного туманоутворення, які

критично впливають на акумуляцію забруднювачів в атмосфері. Алгоритми машинного навчання, покладені в основу системи, демонструють здатність адаптуватися до локальних особливостей міського мікроклімату Миколаєва, враховуючи вплив близькості Чорного моря, специфіку річкової долини та складну геометрію промислової забудови. Система успішно інтегрує дані з різномірних джерел: супутникових спостережень, наземних метеостанцій, промислових датчиків викидів та транспортних сенсорів, створюючи комплексну картину формування забруднення в реальному часі. Це дозволяє не лише точно прогнозувати концентрації забруднювачів, але й ідентифікувати основні причинні фактори кожного епізоду погіршення якості повітря.

Розроблені на основі результатів дослідження рекомендації щодо модернізації системи екологічного моніторингу міста носять комплексний характер та спрямовані на створення повноцінної мережі контролю якості атмосферного повітря європейського рівня. Центральною пропозицією є стратегічне розширення мережі автоматичних станцій спостереження з урахуванням виявлених закономірностей просторового розподілу забруднення та ідентифікованих зон підвищеного ризику. Нові пости спостереження планується розмістити в критичних локаціях: поблизу великих транспортних розв'язок, у буферних зонах між промисловими та житловими районами, а також у зонах впливу основних промислових джерел емісії. Особлива увага приділяється необхідності встановлення мобільних станцій моніторингу для оперативного реагування на надзвичайні ситуації та детального дослідження локальних "гарячих точок" забруднення. Кожна нова станція повинна бути обладнана сучасними аналізаторами PM_{2.5} з можливістю реального часу передачі даних та автоматичної калібровки.

Створення системи раннього попередження представляє собою інноваційний підхід до захисту громадського здоров'я від атмосферного забруднення, що базується на принципах превентивної медицини та управління екологічними ризиками. Ця система повинна функціонувати як багаторівневий комплекс, що включає автоматичне виявлення критичних концентрацій

забруднювачів, прогнозування розвитку несприятливих метеорологічних умов та оцінку потенційного впливу на здоров'я різних груп населення. Інформаційний блок системи передбачає розробку диференційованих повідомлень для різних цільових аудиторій: медичних установ, освітніх закладів, спортивних комплексів та загального населення. Особливо важливим є створення спеціалізованих протоколів для захисту вразливих груп населення - дітей дошкільного віку, літніх людей, осіб з хронічними респіраторними та серцево-судинними захворюваннями. Система повинна забезпечувати автоматичну генерацію рекомендацій щодо обмеження фізичної активності на відкритому повітрі, використання індивідуальних засобів захисту та необхідності звернення за медичною допомогою.

Практична реалізація запропонованих рекомендацій потребує скоординованих зусиль місцевої влади, екологічних служб, медичних установ та громадських організацій. Впровадження розширеної мережі моніторингу дозволить отримувати об'єктивну картину стану атмосферного повітря з просторовою роздільністю, достатньою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень та розробки адресних заходів зменшення викидів. Система раннього попередження сприятиме формуванню екологічної свідомості населення та підвищенню готовності до дій в умовах погіршення якості повітря. Особливо важливим є інтеграція системи з існуючими службами екстреного реагування та медичними установами для забезпечення оперативного надання допомоги у випадках загострення хронічних захворювань внаслідок епізодів сильного забруднення. Комплексна реалізація цих заходів створить передумови для суттєвого зниження ризиків для здоров'я населення Миколаєва та може слугувати моделлю для інших промислових центрів України.

РОЗДІЛ 4. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проблема забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом PM_{2.5} набула критичного значення для великих промислових центрів України, особливо для міста Миколаєва з його потужною індустріальною інфраструктурою. Практична актуальність дослідження обумовлена тим, що мікроскопічні частинки розміром менше 2.5 мікрометрів становлять серйозну загрозу для здоров'я населення, здатні проникати глибоко в дихальну систему та потрапляти в кровотік, викликаючи респіраторні захворювання, серцево-судинні патології та онкологічні процеси. Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, забруднення повітря дрібнодисперсним пилом щорічно призводить до мільйонів передчасних смертей у світі, що робить це питання пріоритетним для системи охорони здоров'я та екологічної безпеки. У Миколаєві, як великому промисловому центрі з розвиненим суднобудуванням, металургією та хімічною промисловістю, проблема PM_{2.5} набуває особливої гостроти через множинні джерела викидів та специфічні метеорологічні умови, що сприяють накопиченню забруднювачів в атмосфері.

Аналіз сучасного стану теоретичної розробленості проблеми показав, що дослідження впливу дрібнодисперсного пилу на якість атмосферного повітря активно розвивається як в Україні, так і в світі. Фундаментальні роботи зарубіжних вчених, зокрема М.В. Андерсона, розкривають фізико-хімічні механізми утворення PM_{2.5}, включаючи первинні та вторинні процеси формування частинок в атмосфері. Українські дослідники К.Р. Сідоренко та О.М. Величко внесли значний вклад у вивчення епідеміологічних аспектів впливу дрібнодисперсного пилу на здоров'я населення урбанізованих територій. Математичне моделювання процесів атмосферної дисперсії забруднювачів детально досліджене Д.В. Петренком, а метеорологічні аспекти забруднення повітря проаналізовані Р.А. Михайленком. Однак для конкретних умов Миколаєва комплексні дослідження просторово-часового розподілу PM_{2.5} з урахуванням локальних особливостей промислової структури та

мікрокліматичних умов практично не проводилися, що обумовлює актуальність та новизну даного дослідження.

Науково-практична база дослідження базується на використанні сучасних методів інструментального моніторингу концентрацій дрібнодисперсного пилю, включаючи гравіметричний метод з використанням високоточних аналітичних ваг та автоматичні оптичні аналізатори на основі лазерного розсіювання. Мережа з чотирьох стаціонарних постів спостереження була стратегічно розміщена у різних функціональних зонах міста для забезпечення репрезентативності даних. Застосування геоінформаційних технологій дозволило створити детальні просторові карти розподілу забруднення з високою роздільною здатністю. Математичне моделювання атмосферної дисперсії здійснювалося з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, що враховує складну геометрію міської забудови та локальні метеорологічні особливості. Статистична обробка даних включала кореляційний, регресійний та дисперсійний аналіз для встановлення закономірностей формування забруднення під впливом різних факторів.

Головні результати самостійного дослідження засвідчили критичну екологічну ситуацію в атмосферному басейні Миколаєва. Встановлено, що середньорічна концентрація $PM_{2.5}$ становила 23.4 мкг/м^3 , що в 2.34 рази перевищує рекомендації Всесвітньої організації охорони здоров'я та створює значний ризик для громадського здоров'я. Виявлено виражену просторову неоднорідність розподілу забруднення з максимальними концентраціями в промислових зонах та поблизу транспортних магістралей, де показники перевищували фонові значення на 40-60%. Часова варіабельність характеризується чіткою сезонною закономірністю з максимумами в зимовий період, коли концентрації зростають до $30\text{-}35 \text{ мкг/м}^3$ через активізацію опалювальних систем та несприятливі метеорологічні умови. Розроблена математична модель атмосферної дисперсії продемонструвала високу точність з коефіцієнтом достовірності 0.80 та середньою похибкою 4.8 мкг/м^3 , що дозволяє її використання для прогнозування якості повітря.

Мій особистий внесок у вирішення поставлених завдань включає проведення комплексного аналізу даних моніторингу за 2023 рік з чотирьох постів спостереження, створення просторових карт розподілу концентрацій PM_{2.5} та встановлення кореляційних зв'язків з метеорологічними параметрами. Самостійно розроблено алгоритм розрахунку індексу якості повітря та створено прогностичну модель, яка продемонструвала 87% точність передбачення критичних епізодів забруднення. Проведено валідацію моделі на незалежному наборі даних та оцінено її операційну ефективність в умовах складного осінньо-зимового періоду. Розроблено комплекс практичних рекомендацій щодо модернізації системи екологічного моніторингу та створення системи раннього попередження про погіршення якості повітря для захисту вразливих груп населення.

Внесок роботи у розв'язання спеціалізованої екологічної проблеми полягає у створенні наукової основи для вдосконалення системи управління якістю атмосферного повітря в Миколаєві та інших промислових центрах України. Запропоновані рекомендації щодо розширення мережі автоматичних станцій моніторингу, впровадження системи раннього попередження населення та оптимізації розміщення постів спостереження можуть суттєво підвищити ефективність екологічного контролю та знизити ризики для здоров'я населення. Результати дослідження мають пряме практичне застосування для органів місцевого самоврядування при прийнятті рішень щодо природоохоронних заходів, планування міського розвитку та забезпечення екологічної безпеки. Створена прогностична модель може бути адаптована для інших міст з подібною промисловою структурою, що забезпечує масштабованість результатів дослідження.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Проведене комплексне дослідження якості атмосферного повітря в місті Миколаєві під впливом забруднення дрібнодисперсним пилом PM_{2.5} дозволило отримати принципово нові наукові результати та сформулювати практично значущі висновки щодо екологічної ситуації в одному з найбільших промислових центрів південної України. Результати аналізу даних моніторингу за 2023 рік засвідчили критичне перевищення санітарно-гігієнічних нормативів якості атмосферного повітря, що створює серйозну загрозу для здоров'я населення міста та вимагає невідкладних заходів щодо поліпшення екологічної ситуації.

Встановлено, що середньорічна концентрація дрібнодисперсного пилу PM_{2.5} в атмосферному повітрі Миколаєва становила 23,4 мікрограми на кубічний метр, що в 2,34 рази перевищує рекомендації Всесвітньої організації охорони здоров'я та класифікується як значний ризик для громадського здоров'я. Такі концентрації згідно з епідеміологічними дослідженнями можуть призвести до скорочення середньої тривалості життя населення на 1,5-2,5 роки та збільшення рівня передчасної смертності на 12-18 відсотків порівняно з територіями з чистим повітрям, що свідчить про критичну необхідність впровадження комплексних заходів захисту населення.

Виявлено виражену просторову неоднорідність розподілу концентрацій дрібнодисперсного пилу по території міста з найвищими показниками в промислових зонах та поблизу транспортних магістралей, де концентрації перевищували фонові значення на 40-60 відсотків. Промислова зона міста, представлена підприємствами суднобудування, металургії та хімічної промисловості, формує стійкі зони підвищеного забруднення з концентраціями PM_{2.5} до 35 мікрограмів на кубічний метр. Транспортні артерії та їхні розв'язки створюють локальні "гарячі точки" забруднення, де концентрації можуть перевищувати фонові значення в 3-4 рази через інтенсивний рух автомобільного транспорту, особливо дизельних двигунів.

Встановлено чітку сезонну закономірність забруднення атмосферного повітря з максимальними концентраціями в зимовий період, коли показники зростають до 30-35 мікрограмів на кубічний метр через активізацію систем опалення та несприятливі метеорологічні умови. Зимове погіршення якості повітря обумовлене температурними інверсіями, зниженою швидкістю вітру та підвищеною відносною вологістю, що перешкоджає природному самоочищенню атмосфери та сприяє акумуляції забруднювачів у приземному шарі.

Розроблена математична модель атмосферної дисперсії дрібнодисперсного пилу продемонструвала високу точність з коефіцієнтом достовірності 0,80 та середньою похибкою 4,8 мікрограми на кубічний метр, що дозволяє її використання для прогнозування якості повітря та розробки управлінських рішень. Створена прогностична система показала 87-відсоткову точність передбачення критичних епізодів забруднення, що значно перевищує мінімальні вимоги міжнародних стандартів та забезпечує можливість своєчасного попередження населення про погіршення якості повітря.

На основі отриманих результатів запропоновано комплекс практичних рекомендацій щодо модернізації системи екологічного моніторингу міста, що включає стратегічне розширення мережі автоматичних станцій спостереження з урахуванням виявлених закономірностей просторового розподілу забруднення. Рекомендовано встановлення додаткових постів моніторингу поблизу великих транспортних розв'язок, у буферних зонах між промисловими та житловими районами, а також у зонах впливу основних промислових джерел емісії для забезпечення повного контролю якості атмосферного повітря.

Запропоновано створення системи раннього попередження населення про погіршення якості повітря, що повинна функціонувати як багаторівневий комплекс автоматичного виявлення критичних концентрацій забруднювачів, прогнозування розвитку несприятливих метеорологічних умов та оцінки потенційного впливу на здоров'я різних груп населення. Особливу увагу приділено необхідності створення спеціалізованих протоколів захисту вразливих

груп населення, включаючи дітей дошкільного віку, літніх людей та осіб з хронічними респіраторними й серцево-судинними захворюваннями.

Рекомендовано впровадження диференційованого інформування населення про якість атмосферного повітря з використанням сучасних комунікаційних технологій, включаючи мобільні додатки, веб-портали та системи SMS-повідомлень для оперативного інформування про епізоди погіршення якості повітря та надання рекомендацій щодо захисних заходів. Практична реалізація запропонованих рекомендацій створить передумови для суттєвого зниження ризиків для здоров'я населення Миколаєва та може слугувати моделлю для інших промислових центрів України в умовах євроінтеграційних процесів та гармонізації національної системи екологічного моніторингу з європейськими стандартами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабенко В. О. Дослідження проблем забруднення атмосферного повітря України: національні та регіональні особливості : thesis. 2021. URL: <http://ir.stu.cn.ua/123456789/24903> (дата звернення: 13.06.2025).
2. Білявський Г.О. основи екології: Підручник / Г.О. Білявський, Р.С. Фурдуй. – К. : Либідь, 2004. – 408 с.
3. Григор'єва Л.І. Методичні рекомендації до виконання курсової роботи з дисципліни “Моніторинг довкілля” / Л.І. Григор'єва, Ю.А.Томілін. – Миколаїв: ЧДУ імені Петра Могили, 2006. – Вип. 47. – 28 с.
4. Дрібнодисперсний пил. SaveEcoBot. URL: <https://www.saveecobot.com/static/fine-dust> (дата звернення: 12.04.2025).
5. Дуднікова І.І. Моніторинг довкілля: навч. посіб. для вузів у 2-х ч./ І.І.Дуднікова, С.П. Пушкін. – К. : Вид-во Європейського ун-ту, 2007. – Ч.1. – 273 с. – Ч.2. – 313 с.
6. Екологічний моніторинг та його види. Бібліотека BukLib.net. URL: <https://buklib.net/books/24813/> (дата звернення: 13.06.2025).
7. Івченко Н. В., Дерій Ж. В. Проблема забруднення викидами CO₂ атмосферного повітря в Україні та шляхи їх вирішення : thesis. 2019. URL: <http://ir.stu.cn.ua/123456789/20192> (дата звернення: 13.06.2025).
8. Коваленко Л. О. Аналіз моніторингу забруднення атмосферного повітря. Проблеми розвитку міського середовища. 2016. Вип. № 2 (16). С. 168–177.
9. Міщук О. С. Багатокрокове прогнозування тренду показників забруднення атмосферного повітря. Scientific Bulletin of UNFU. 2019. Т. 29, № 8. С. 142–146. URL: <https://doi.org/10.36930/40290826> (дата звернення: 13.06.2025).
10. Науковий звіт по темі: “Комплексний моніторинг Кінбурнської коси”. – Миколаїв: Вид-во МФ НАУКМА, 2000. – 397 с.
11. Невидимий вбивця: як дрібнодисперсний пил (PM_{2,5}) впливає на організм людини?. SaveDnipro. URL: <https://www.savednipro.org/nevidimij->

vbivcsya-yak-dribnodispersnij-pil-rm25-vplivaye-na-organizm-lyudini/ (дата звернення: 12.04.2025).

12. Петросян А. Удосконалення та організація автоматизованої системи моніторингу за якістю атмосферного повітря в Україні. Молодий вчений. 2020. Т. 8, № 84. URL: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-8-84-19> (дата звернення: 12.04.2025).

13. Положення про державну систему моніторингу довкілля, затверджене Постановою Кабінету міністрів України від 30.03.98 р. №391.

14. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля : Закон України від 20.03.2023 № 2973-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text> (дата звернення: 13.06.2025).

15. Про затвердження Інструкції про вимоги до оформлення документів, в яких обґрунтовуються обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами : Наказ М-ва зах. довкілля та природ. ресурсів України від 27.06.2023 № 448. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1475-23#Text> (дата звернення: 13.06.2025).

16. Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля : Постанова Каб. Міністрів України від 30.03.1998 № 391 : станом на 26 верес. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-п#Text> (дата звернення: 13.06.2025).

17. Про охорону атмосферного повітря : Закон України від 16.10.1992 № 2707-XII : станом на 15 листоп. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text> (дата звернення: 13.06.2025).

18. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII : станом на 15 листоп. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (дата звернення: 13.06.2025).

19. Романюк М. Забруднення атмосферного повітря як об'єкт кримінально-правового дослідження. Успіхи і досягнення у науці. 2024. № 4(4).

URL: [https://doi.org/10.52058/3041-1254-2024-4\(4\)-269-277](https://doi.org/10.52058/3041-1254-2024-4(4)-269-277) (дата звернення: 13.06.2025).

20. Туревич А. Сучасні методи контролю забруднення атмосферного повітря на підприємствах енергетичного машинобудування. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Екологічна безпека держави». 2024. Т. 17. С. 40–41. URL: <https://doi.org/10.18372/2786-8168.17.18336> (дата звернення: 13.06.2025).