

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування

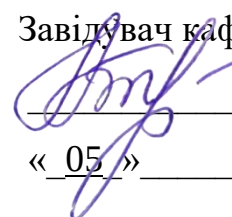
імені адмірала Макарова

Факультет економіки та екології моря

Кафедра екології та природоохоронних технологій

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 Трохименко Г.Г.

« 05 » 06 2026 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

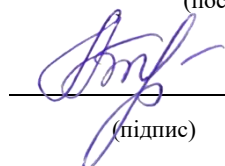
на тему **«ОЦІНКА ВПЛИВУ БОЙОВИХ ДІЙ НА ЯКІСТЬ
АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ
ЩОДО ЙОГО ВІДНОВЛЕННЯ»**

Виконав: студент 4 курсу 4281 групи

 Захаров М. С.
(підпис)

Керівник: д.т.н., професор

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

 Трохименко Г.Г.
(підпис)

м. Миколаїв 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Факультет: економіки та екології моря

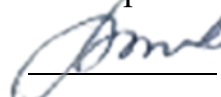
Кафедра: екології та природоохоронних технологій

Спеціальність: 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Освітня програма: Технології захисту навколишнього середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

 Ремешевська І. В.

«03» лютого_ 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Студентці Захарова Михайла Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **«Оцінка впливу бойових дій на якість атмосферного повітря в Україні та розробка заходів щодо його відновлення»**

керівник роботи: Трохименко Ганна Григорівна, д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № 287-уч. від «22» квітня 2026 р. .

2. Термін подання роботи: 05.06.2026

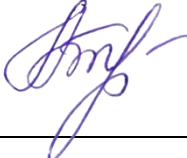
3. Вихідні дані по роботі: звіти підприємства та результати оцінки впливу на довкілля, результати власних досліджень;

4. Перелік питань, що належать до розробки:

5. Перелік презентаційних матеріалів:

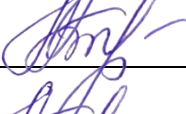
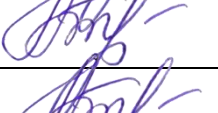
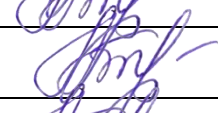
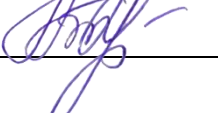
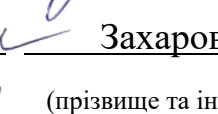
Презентація – 20 аркушів А4

6. Консультанти розділів роботи

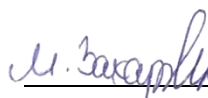
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	Трохименко Г.Г., д.т.н., проф.	03.03.2026 	23.05.2026 

7. Дата видачі завдання 03.03.2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел за темою дослідження		виконано
2	Збір даних, необхідних для проведення дослідження		виконано
3	Аналіз зібраних даних		виконано
4	Розробка заходів зі зменшення впливу на довкілля		виконано
5	Розробка рекомендацій		виконано
8	Подання ДР на допуск до захисту		виконано
9	Захист ДР		виконано

Студент

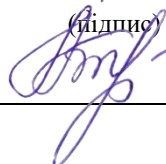


Захаров М. С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



Трохименко Г. Г.

АНОТАЦІЯ

Захаров М. С. Оцінка впливу бойових дій на якість атмосферного повітря в Україні та розробка заходів щодо його відновлення: кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища» / Захаров Михайло Сергійович, керівник: Трохименко Ганна Григорівна. — Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2026. — 84 с.

Кваліфікаційна робота містить основну текстову частину на 79 сторінках, список використаних джерел на 3 сторінках, додатки на 3 сторінках.

У кваліфікаційній роботі досліджено вплив бойових дій на якість атмосферного повітря України та розроблено комплекс заходів щодо його відновлення на прикладі Херсонської області. У роботі розглянуто теоретичні основи формування забруднення атмосферного повітря внаслідок воєнно-техногенного навантаження, визначено основні джерела викидів забруднювальних речовин під час бойових дій та проаналізовано особливості утворення й поширення небезпечних домішок у повітряному середовищі.

Проведено аналіз сучасного стану атмосферного повітря в Україні в умовах воєнного стану, охарактеризовано природно-кліматичні та екологічні особливості Херсонської області як району дослідження. Виконано оцінку основних джерел забруднення атмосферного повітря внаслідок бойових дій, проаналізовано показники якості атмосферного повітря, визначено рівень екологічних ризиків для населення та довкілля, а також проведено порівняльний аналіз стану атмосферного повітря до та після початку активних бойових дій.

На основі отриманих результатів розроблено природоохоронні, організаційно-технічні та моніторингові заходи щодо покращення якості атмосферного повітря. Запропоновано напрями удосконалення системи екологічного моніторингу, післявоєнного відновлення територій, впровадження сучасних технологій очищення атмосферного повітря та підвищення ефективності систем захисту атмосферного повітря в умовах воєнного стану та після завершення бойових дій.

Ключові слова: атмосферне повітря, бойові дії, воєнний стан, забруднення атмосфери, екологічний моніторинг, Херсонська область, екологічні ризики, якість повітря, відновлення довкілля, природоохоронні заходи.

ABSTRACT

Zakharov M. S. Assessment of the Impact of Military Actions on Air Quality in Ukraine and Development of Measures for Its Restoration: bachelor's thesis in the specialty 183 "Environmental Protection Technologies" / Mykhailo S. Zakharov, supervisor: Hanna H. Trokhymenko. — Mykolaiv: Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 2026. — 84 pages.

The thesis consists of a main text of 79 pages, a list of references on 3 pages, and appendices on 3 pages.

The bachelor's thesis is devoted to the assessment of the impact of military actions on air quality in Ukraine and the development of measures for its restoration, using Kherson region as a case study. The paper examines the theoretical foundations of atmospheric air pollution caused by military and technogenic impacts. The main sources of pollutant emissions resulting from military operations are identified, and the processes of formation and distribution of hazardous atmospheric contaminants are analyzed.

The study provides an analysis of the current state of atmospheric air quality in Ukraine under martial law conditions and characterizes the natural, climatic, and environmental features of Kherson region as the research area. The main sources of air pollution caused by military activities are assessed, air quality indicators are analyzed, environmental risks to the population and ecosystems are evaluated, and a comparative analysis of air quality before and after the beginning of active military actions is carried out.

Based on the obtained results, a set of environmental, organizational, technical, and monitoring measures aimed at improving air quality has been developed. The paper proposes directions for improving the environmental monitoring system, restoring territories affected by military actions, implementing modern air purification technologies, and increasing the efficiency of air protection systems during martial law and in the post-war recovery period.

Keywords: atmospheric air, military actions, martial law, air pollution, environmental monitoring, Kherson region, environmental risks, air quality, environmental restoration, environmental protection measures.

ЗМІСТ

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ ВПЛИВУ БОЙОВИХ ДІЙ НА ЯКІСТЬ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ	13
1.1 Основні джерела забруднення атмосферного повітря внаслідок бойових дій.....	13
1.2. Сучасний стан атмосферного повітря на території України в умовах воєнного стану	17
1.3. Характеристика району дослідження	20
1.3.1 Вплив кліматичних змін на формування якості атмосферного повітря в Херсонській області	24
1.4. Основні забруднюючі речовини та їх характеристика.....	27
1.5. Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення	31
1.6. Нормативно-правове забезпечення контролю якості атмосферного повітря в Україні	37
РОЗДІЛ II. АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ТА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ	41
2.1. Загальна характеристика району дослідження	41
2.2. Основні джерела забруднення атмосферного повітря внаслідок бойових дій з розрахунками	46
2.3. Аналіз показників забруднення атмосферного повітря.....	49
2.4. Оцінка екологічних ризиків для населення та довкілля.....	56
2.5. Порівняльний аналіз стану атмосферного повітря до та після початку бойових дій	60
РОЗДІЛ III. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....	70
3.1. Розробка заходів щодо покращення якості атмосферного повітря.....	70
3.2. Удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря.....	74

3.3. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЕКОЛОГІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ, ЩО ПОСТРАЖДАЛИ ВНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ	79
3.4. ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ	84
3.5. ДОЦІЛЬНІСТЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ ТА ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ	89
РОЗДІЛ V. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ.....	92
5.1 ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ОХОРОНИ ПРАЦІ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	92
5.2 НЕБЕЗПЕЧНІ ТА ШКІДЛИВІ ФАКТОРИ ПІД ЧАС ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	94
5.3 ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	97
5.4 ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА ТА ДІЇ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	99
ВИСНОВКИ.....	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	106
ДОДАТКИ.....	110

ВСТУП

Атмосферне повітря є одним із ключових компонентів навколишнього природного середовища, який забезпечує існування біосфери, підтримує процеси життєдіяльності живих організмів та визначає рівень екологічної безпеки держави. Стан атмосферного повітря безпосередньо впливає на здоров'я населення, функціонування екосистем, продуктивність сільського господарства, водний баланс територій та кліматичні процеси. У сучасних умовах військових конфліктів проблема охорони атмосферного повітря набуває особливої актуальності через масштабний і комплексний вплив бойових дій на довкілля.

Воєнні дії належать до надзвичайно небезпечних антропогенних факторів, які формують потужне техногенне навантаження на природне середовище. На відміну від звичайного промислового забруднення, вплив війни характеризується високою інтенсивністю, неконтрольованістю, раптовістю та значною просторовою масштабністю. У процесі ведення бойових дій відбувається одночасне руйнування промислових підприємств, транспортної інфраструктури, енергетичних об'єктів, житлових будівель та природних екосистем, що призводить до масових викидів токсичних речовин у атмосферу.

Особливо гостро проблема забруднення атмосферного повітря проявилась на території України після початку повномасштабних бойових дій у 2022 році. Внаслідок систематичних обстрілів та бомбардувань значних руйнувань зазнали теплоелектростанції, нафтобази, металургійні комбінати, хімічні підприємства, логістичні центри та об'єкти житлової забудови. Руйнування таких об'єктів супроводжується виникненням пожеж та потраплянням у повітря значної кількості продуктів горіння і токсичних сполук.

Однією з головних особливостей забруднення атмосферного повітря в умовах війни є формування багатокомпонентного складу викидів. До

атмосфери надходять оксиди азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, аміак, феноли, формальдегід, важкі метали, сажа, канцерогенні органічні речовини та дрібнодисперсні частинки. Значна частина цих сполук характеризується високою токсичністю та здатністю до тривалого збереження у навколишньому середовищі [13, 14, 21, 24].

Особливу небезпеку становлять дрібнодисперсні аерозолі PM_{2.5} та PM₁₀. Дані частинки утворюються внаслідок вибухів, пожеж, руйнування будівель та роботи військової техніки. Через надзвичайно малі розміри вони здатні тривалий час перебувати у повітрі та проникати глибоко у дихальну систему людини. Частинки PM_{2.5} можуть проникати через альвеоли легень у кровоносну систему, викликаючи серцево-судинні захворювання, хронічні бронхіти, астму та онкологічні патології. За даними міжнародних екологічних організацій, у районах активних бойових дій концентрації дрібнодисперсного пилу можуть перевищувати нормативні значення у декілька разів [21, 22, 23].

Додатковою проблемою є токсичне забруднення атмосферного повітря продуктами горіння нафтопродуктів, пластмас, синтетичних матеріалів та гумових виробів. Під час пожеж на промислових об'єктах і складах паливно-мастильних матеріалів утворюються поліциклічні ароматичні вуглеводні, діоксини та фурані, які належать до особливо небезпечних канцерогенних речовин. Вони здатні накопичуватися у живих організмах, тривалий час зберігатися у природному середовищі та негативно впливати на репродуктивну, ендокринну та імунну системи людини.

Суттєву загрозу становлять також викиди важких металів, які утворюються під час детонації боєприпасів, згоряння військової техніки та руйнування промислових об'єктів. У повітря потрапляють сполуки свинцю, кадмію, ртуті, нікелю, міді, марганцю та хрому. Дані елементи характеризуються високою токсичністю та біоаккумулятивними властивостями. Потрапляючи в організм людини, вони можуть викликати порушення функціонування нервової системи, нирок, печінки та органів кровотворення.

Важливою особливістю воєнного забруднення є його довготривалий характер. Навіть після завершення активної фази бойових дій значна кількість забруднювальних речовин продовжує циркулювати у навколишньому середовищі. Частинки пилу та токсичні аерозолі осідають на поверхню ґрунтів і водних об'єктів, формуючи вторинне забруднення. Під впливом вітру та атмосферних процесів вони можуть повторно потрапляти у повітря, підтримуючи високий рівень забруднення протягом тривалого часу.

Окрему небезпеку становлять аварії на підприємствах хімічної промисловості та енергетики. Руйнування резервуарів з аміаком, хлором, кислотами та іншими небезпечними речовинами може спричинити утворення токсичних хмар, здатних поширюватися на десятки кілометрів. Такі ситуації створюють ризик виникнення масштабних екологічних катастроф та потребують оперативного екологічного моніторингу.

Проблема оцінки якості атмосферного повітря в умовах війни ускладнюється частковим або повним руйнуванням систем екологічного моніторингу. Значна частина стаціонарних постів спостереження може бути пошкоджена або розташована у небезпечних районах, що обмежує можливість проведення регулярних вимірювань. У таких умовах особливого значення набуває використання автоматизованих станцій контролю, мобільних лабораторій, супутникових технологій та методів дистанційного зондування Землі.

Важливим аспектом є також транскордонний характер поширення атмосферного забруднення. Повітряні маси можуть переносити токсичні речовини на значні відстані, що призводить до погіршення якості повітря навіть у регіонах, віддалених від районів активних бойових дій. Таким чином, проблема забруднення атмосферного повітря внаслідок війни виходить за межі окремої держави та набуває міжнародного значення.

Негативний вплив забрудненого атмосферного повітря проявляється не лише у погіршенні здоров'я населення, але й у порушенні функціонування природних екосистем. Підвищення концентрацій токсичних речовин

призводить до деградації рослинного покриву, зниження продуктивності сільськогосподарських культур, кислотних опадів та змін біогеохімічних циклів. Особливо вразливими є природоохоронні території, ліси, степові екосистеми та водно-болотні угіддя.

Таким чином, бойові дії формують складний комплекс екологічних проблем, пов'язаних із забрудненням атмосферного повітря. Масштабність викидів, висока токсичність забруднювальних речовин, руйнування систем моніторингу та довготривалий характер негативного впливу визначають необхідність проведення комплексних досліджень стану атмосферного повітря та розробки ефективних природоохоронних заходів.

Метою дипломної роботи є оцінка впливу бойових дій на якість атмосферного повітря Херсонської області, визначення основних джерел і масштабів забруднення в умовах воєнного навантаження, аналіз просторово-часових змін екологічного стану атмосферного повітря та розробка комплексу заходів щодо його відновлення і мінімізації негативних наслідків для населення та довкілля.

Завдання роботи:

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати наукові та нормативно-правові підходи до оцінки якості атмосферного повітря в умовах воєнного впливу.
2. Дослідити основні джерела забруднення повітря в Україні внаслідок бойових дій.
3. Оцінити вплив бойових дій, пожеж, руйнування промислової та транспортної інфраструктури на рівень забруднення атмосферного повітря регіону.
4. Провести аналіз динаміки концентрацій основних забруднюючих речовин у повітрі Херсонської області у довоєнний та воєнний періоди.

5. Визначити екологічні ризики та можливі наслідки погіршення якості атмосферного повітря для здоров'я населення та природних екосистем регіону.
6. Розробити комплекс природоохоронних і організаційно-технічних заходів щодо відновлення якості атмосферного повітря Херсонської області та підвищення ефективності екологічного моніторингу в післявоєнний період.

РОЗДІЛ І. АНАЛІЗ ВПЛИВУ БОЙОВИХ ДІЙ НА ЯКІСТЬ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ

1.1 Основні джерела забруднення атмосферного повітря внаслідок бойових дій

Бойові дії супроводжуються утворенням значної кількості джерел забруднення атмосферного повітря, які характеризуються високою інтенсивністю викидів, токсичністю продуктів горіння та складністю прогнозування екологічних наслідків (рис. 1.2). Особливістю таких джерел є їх аварійний та неконтрольований характер, що значно ускладнює проведення екологічного моніторингу і оцінку ризиків для населення та довкілля [2, 3, 13, 15].



Рис. 1. 1 Основні чинники впливу бойових дій на атмосферне повітря

Одним із головних джерел забруднення атмосферного повітря є вибухи боєприпасів та застосування ракетного озброєння. У процесі детонації відбуваються складні фізико-хімічні реакції, які супроводжуються утворенням

великої кількості газоподібних та твердих продуктів згоряння. Основними компонентами таких викидів є оксиди азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки, сажа, аміак та дрібнодисперсний пил. Крім того, у повітря потрапляють частинки металів та залишки вибухових речовин.

Особливо небезпечними є термобаричні та фосфорні боєприпаси. Під час їх застосування утворюються надзвичайно високі температури та значні обсяги токсичних аерозолів. Білий фосфор, взаємодіючи з киснем повітря, утворює токсичний дим, який містить оксиди фосфору та кислотоутворюючі сполуки. Дані речовини подразнюють слизові оболонки, викликають опіки дихальних шляхів та мають високу токсичність [13, 15, 32].

Значним джерелом забруднення є пожежі на нафтобазах та складах паливно-мастильних матеріалів. Під час горіння нафтопродуктів у атмосферу потрапляє велика кількість чадного газу, оксидів азоту, діоксиду сірки, сажі та канцерогенних органічних сполук (рис. 1.3). Особливу небезпеку становлять поліциклічні ароматичні вуглеводні, які мають канцерогенні властивості та можуть тривалий час накопичуватися у довкіллі.



Рис. 1. 2 Пожежа після обстрілу Херсону. Фото: ДСНС [45].

Пожежі на промислових підприємствах супроводжуються потраплянням у повітря широкого спектра токсичних речовин залежно від специфіки виробництва. Руйнування хімічних підприємств може призводити до викидів аміаку, хлору, кислотних аерозолів та інших небезпечних сполук. У разі пошкодження металургійних комбінатів у повітря надходять оксиди металів, важкі метали та пилові частинки.

Важливим фактором забруднення є руйнування житлової інфраструктури. Під час обвалення будівель у повітря потрапляють цементний пил, частинки бетону, азбесту, скла та мінеральної вати. Азбестовмісний пил становить особливу небезпеку для здоров'я людини, оскільки може викликати хронічні захворювання легень та онкологічні патології.

Суттєве забруднення атмосферного повітря формує військова техніка. Танки, бронетранспортери, вантажні автомобілі та авіація споживають значні обсяги пального, що супроводжується викидами оксидів азоту, оксиду вуглецю, сажі та незгорілих вуглеводнів. Інтенсивне переміщення техніки також спричиняє вторинне пилове забруднення внаслідок руйнування дорожнього покриття та верхніх шарів ґрунту.

Окремим джерелом забруднення є масштабні лісові та степові пожежі, які виникають внаслідок обстрілів та детонації боєприпасів. Горіння рослинності супроводжується утворенням чадного газу, метану, оксидів азоту, летких органічних сполук та дрібнодисперсного пилу. Такі пожежі можуть охоплювати великі площі та спричиняти тривале задимлення територій [28, 32, 39, 40].

Суттєвий вплив на якість атмосферного повітря мають аварії на об'єктах енергетичної інфраструктури. Руйнування теплоелектростанцій, трансформаторних підстанцій та складів палива супроводжується потраплянням у атмосферу токсичних продуктів горіння мазуту, вугілля та мастильних матеріалів. У разі пошкодження електрообладнання можливе утворення токсичних речовин, зокрема поліхлорованих біфенілів.

У районах активних бойових дій спостерігається також значне підвищення концентрації пилу внаслідок руйнування ґрунтового покриву. Вибухові хвилі руйнують структуру ґрунтів та піднімають у повітря велику кількість мінеральних частинок. У посушливих умовах пилові аерозолі можуть переноситися вітром на значні відстані, створюючи додаткове навантаження на атмосферне повітря.

Важливою особливістю джерел забруднення в умовах війни є їх комплексний вплив. Одночасна дія пожеж, вибухів, руйнування інфраструктури та роботи військової техніки призводить до формування складних багатокомпонентних сумішей забруднювальних речовин. Такі суміші можуть мати синергетичний ефект, коли спільний вплив декількох токсичних речовин є значно небезпечнішим, ніж дія кожної окремо.

Крім безпосереднього забруднення атмосферного повітря, бойові дії спричиняють порушення природних механізмів самоочищення атмосфери. Масштабні пожежі та руйнування зелених насаджень знижують здатність екосистем поглинати вуглекислий газ, пил та токсичні речовини. Вирубання лісів, деградація ґрунтів та знищення рослинного покриву сприяють посиленню пилових процесів і погіршенню мікрокліматичних умов.

Таким чином, джерела забруднення атмосферного повітря внаслідок бойових дій мають складний багатофакторний характер і формують значне екологічне навантаження на довкілля. Їх дія супроводжується викидами токсичних, канцерогенних та пилових речовин, які негативно впливають на здоров'я населення, природні екосистеми та екологічну безпеку держави [2, 3, 13, 15].

1.2. Сучасний стан атмосферного повітря на території України в умовах воєнного стану

Початок повномасштабних бойових дій на території України у 2022 році спричинив різке зростання техногенного навантаження на всі компоненти навколишнього природного середовища, зокрема на атмосферне повітря. Воєнні дії стали потужним джерелом неконтрольованого забруднення атмосфери, що супроводжується масштабними викидами токсичних речовин, продуктів горіння та пилових аерозолів. Сучасний стан атмосферного повітря в Україні характеризується значною просторовою неоднорідністю, високою динамічністю змін та локальними перевищеннями гранично допустимих концентрацій забруднювальних речовин [18, 25, 26].

Найбільшого негативного впливу зазнали регіони, на території яких ведуться або велися активні бойові дії. До таких територій належать Донецька, Луганська, Харківська, Запорізька, Херсонська, Миколаївська та частково Дніпропетровська області. У зазначених регіонах спостерігаються систематичні викиди забруднювальних речовин унаслідок обстрілів, вибухів, руйнування промислових підприємств та виникнення масштабних пожеж [32, 33, 34, 36].

Особливо значне погіршення якості атмосферного повітря спостерігалось після масованих атак на енергетичну інфраструктуру України. Руйнування теплоелектростанцій, трансформаторних підстанцій, складів палива та об'єктів енергетики супроводжувалося масштабними пожежами, під час яких у повітря потрапляли продукти згоряння мазуту, вугілля, мастильних матеріалів та синтетичних компонентів. Такі процеси спричиняли підвищення концентрацій оксиду вуглецю, діоксиду сірки, оксидів азоту та дрібнодисперсного пилу.

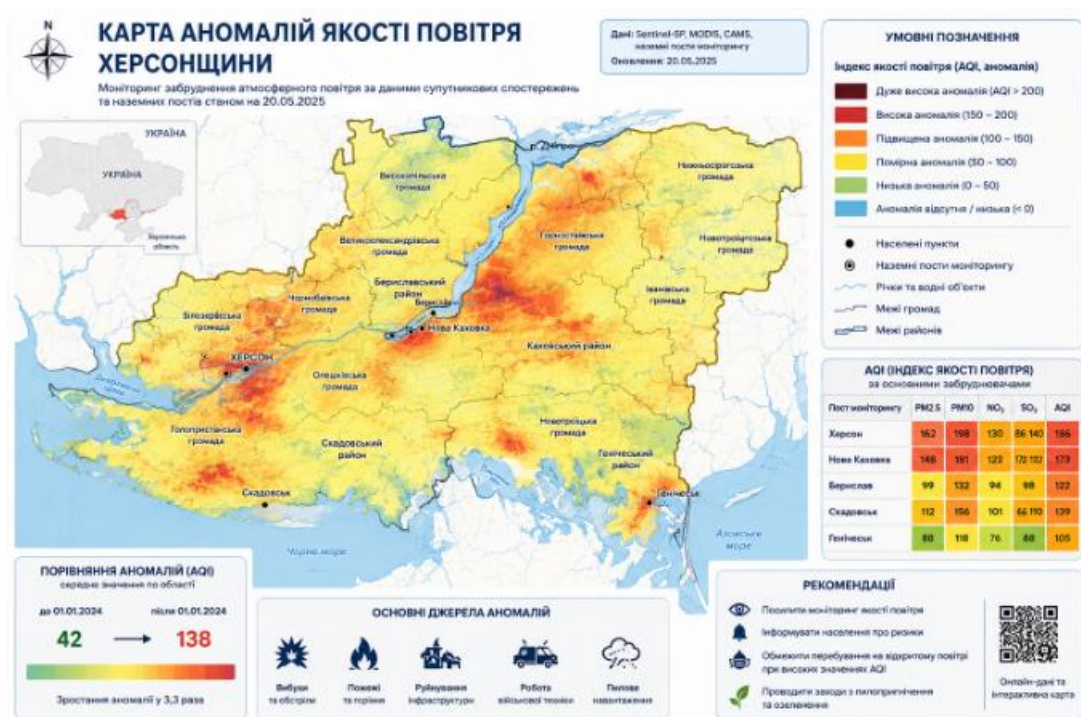


Рис. 1.3 Карта аномалій якості повітря Херсонщини

Однією з основних характеристик сучасного стану атмосферного повітря в умовах війни є підвищення концентрацій твердих завислих частинок PM2.5 та PM10. Джерелами утворення таких частинок є вибухи боєприпасів, пожежі, руйнування будівель та переміщення важкої військової техніки. У районах активних бойових дій концентрації дрібнодисперсного пилу можуть перевищувати санітарно-гігієнічні нормативи у декілька разів. Найвищі показники забруднення спостерігаються під час інтенсивних обстрілів та великих пожеж [21, 22, 23, 24].

Дрібнодисперсні частинки є особливо небезпечними через їх здатність проникати у нижні відділи дихальної системи людини. Частинки PM2.5 можуть потрапляти у кровоносну систему та викликати серцево-судинні, респіраторні та онкологічні захворювання. Умови воєнного стану значно підвищують ризики впливу таких забруднень на населення через обмежений доступ до медичної допомоги, стресові фактори та тривале перебування людей у зонах підвищеного забруднення [21, 22, 23].

Значний вплив на якість атмосферного повітря мають пожежі на промислових та цивільних об'єктах. Під час горіння житлових будинків, складів, нафтобаз та виробничих приміщень у атмосферу потрапляють високотоксичні речовини, серед яких бензапірен, формальдегід, феноли, діоксини та поліциклічні ароматичні вуглеводні. Такі сполуки мають канцерогенні властивості та здатні тривалий час зберігатися у навколишньому середовищі.

Особливу небезпеку становлять пожежі на об'єктах нафтогазової інфраструктури. Горіння великої кількості нафтопродуктів супроводжується утворенням густого диму, що містить сажу, оксиди сірки, леткі органічні сполуки та канцерогенні аерозолі. Масштабні пожежі можуть тривати декілька діб, формуючи стійкі зони атмосферного забруднення та спричиняючи погіршення якості повітря навіть у віддалених регіонах.

Суттєвий вплив на стан атмосферного повітря здійснює руйнування промислових підприємств. Україна має значний промисловий потенціал, зосереджений переважно у східних та південних регіонах. Руйнування металургійних комбінатів, коксохімічних заводів, хімічних підприємств та інших промислових об'єктів супроводжується потраплянням у повітря широкого спектра токсичних речовин. Особливу небезпеку становлять аварії на хімічно небезпечних об'єктах, де можливий викид аміаку, хлору та кислотних аерозолів.

В умовах воєнного стану значно зросла кількість лісових та степових пожеж. Причиною їх виникнення є артилерійські обстріли, падіння уламків ракет, вибухи боєприпасів та детонація мін. Горіння рослинності супроводжується виділенням чадного газу, оксидів азоту, дрібнодисперсного пилу та великої кількості диму. Такі пожежі погіршують якість повітря на значних територіях та можуть сприяти формуванню смогу.

Сучасний стан атмосферного повітря характеризується також зростанням рівня вторинного пилового забруднення. Руйнування дорожнього покриття, будівель та інженерних споруд призводить до накопичення великої кількості

пилу на поверхні територій. Під впливом вітру та переміщення транспорту пил повторно потрапляє у атмосферу, підтримуючи високий рівень забруднення.

Важливою проблемою є обмеження функціонування систем моніторингу атмосферного повітря. Частина стаціонарних постів спостереження опинилася на окупованих територіях або була пошкоджена внаслідок бойових дій. Це значно ускладнює отримання достовірної інформації про рівень забруднення атмосферного повітря та прогнозування екологічних ризиків. У таких умовах важливу роль відіграють мобільні лабораторії, автоматизовані станції моніторингу та супутникові системи спостереження.

Слід зазначити, що атмосферне забруднення в умовах війни має не лише локальний, а й регіональний характер. Повітряні маси здатні переносити токсичні речовини на великі відстані, що призводить до погіршення якості повітря навіть у регіонах, де безпосередньо не ведуться бойові дії. Особливо небезпечним є перенесення дрібнодисперсних аерозолів та продуктів горіння.

Таким чином, сучасний стан атмосферного повітря в Україні в умовах воєнного стану характеризується значним погіршенням екологічної ситуації, зростанням концентрацій токсичних речовин, підвищенням рівня пилового навантаження та масштабними ризиками для здоров'я населення. Основними чинниками забруднення є вибухи, пожежі, руйнування промислових підприємств, функціонування військової техніки та масштабні природні пожежі.

1.3. Характеристика району дослідження

Місто Херсон є одним із найбільших промислових та транспортних центрів півдня України, який упродовж останніх років перебуває у зоні активного впливу бойових дій. В умовах воєнного стану територія міста зазнає значного антропогенного та техногенного навантаження, що безпосередньо впливає на стан атмосферного повітря. Аналіз екологічного стану повітряного басейну Херсона потребує комплексного врахування природно-географічних, кліматичних та господарських особливостей регіону, оскільки саме вони

визначають характер поширення та накопичення забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери.

Географічне положення міста Херсон характеризується вигідним розташуванням у південній частині України, в межах Причорноморської низовини, на правому березі річки Дніпро поблизу її впадіння до Дніпровсько-Бузького лиману Чорного моря. Місто є адміністративним центром Херсонської області та важливим транспортним вузлом, через який проходять автомобільні, залізничні та водні магістралі. Географічні координати Херсона становлять приблизно $46^{\circ}39'$ північної широти та $32^{\circ}37'$ східної довготи. Територія міста характеризується переважно рівнинним рельєфом із незначними перепадами висот, що створює умови для відносно вільного переміщення повітряних мас [20].

Особливе значення для формування екологічного стану атмосферного повітря має близькість Херсона до акваторії Чорного моря та наявність великої річкової системи. Водні об'єкти впливають на локальну циркуляцію повітря, рівень вологості та температурний режим. Разом із тим рівнинний рельєф сприяє поширенню забруднювальних речовин на значні відстані, особливо за умов сильних вітрів, характерних для степової зони півдня України. У періоди безвітряної погоди або температурних інверсій можливе накопичення шкідливих домішок у приземному шарі атмосфери, що створює небезпечні умови для населення.

Клімат міста Херсон є помірно континентальним із вираженими рисами посушливого степового клімату. Для регіону характерні тривале жарке літо та відносно м'яка малосніжна зима. Середньорічна температура повітря становить близько $+11^{\circ}\text{C}$. У літній період температура нерідко перевищує $+30^{\circ}\text{C}$, тоді як у зимовий період середні температури коливаються в межах від 0°C до -3°C . Кількість атмосферних опадів є недостатньою та становить у середньому 350–450 мм на рік, причому більша їх частина припадає на теплий період року.

Кліматичні умови Херсона суттєво впливають на процеси формування якості атмосферного повітря. Високі температури повітря та інтенсивне

сонячне випромінювання влітку сприяють активізації фотохімічних реакцій у атмосфері, унаслідок чого утворюються вторинні забруднювачі, зокрема приземний озон та фотохімічний смог. У посушливі періоди збільшується кількість пилу в атмосферному повітрі, що особливо актуально в умовах руйнування інфраструктури та ґрунтового покриття внаслідок бойових дій. Значний вплив на розсіювання забруднювальних речовин мають вітрові режими. Для Херсонського регіону характерні переважно північні та північно-східні вітри, швидкість яких у середньому становить 4–6 м/с. За умов сильного вітру продукти горіння, пил та аерозолі можуть переноситися на значні відстані, охоплюючи як міську територію, так і прилеглі населені пункти.



Рис. 1.4 Руйнування у Херсоні після атаки 16 квітня

В умовах бойових дій кліматичні фактори набувають особливої важливості, оскільки визначають характер поширення токсичних речовин, які утворюються внаслідок вибухів, пожеж, руйнування будівель, складів паливно-мастильних матеріалів та промислових об'єктів. У літній період підвищується ризик виникнення масштабних пожеж у природних екосистемах та на територіях промислових підприємств, що супроводжується значними викидами оксидів азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки, дрібнодисперсного пилу та канцерогенних органічних сполук.

Промисловість Херсона історично була представлена суднобудівною, машинобудівною, харчовою, нафтопереробною та легкою галузями. Значний

вплив на формування атмосферного повітря міста мали великі промислові підприємства, транспортна інфраструктура та портовий комплекс. До початку повномасштабних бойових дій важливу роль у господарстві міста відігравали суднобудівні та судноремонтні підприємства, підприємства енергетичного сектору, об'єкти комунального господарства та транспортні вузли.

Унаслідок воєнних дій значна частина промислової інфраструктури зазнала руйнувань або часткового припинення діяльності. Разом із цим виникли нові джерела забруднення атмосферного повітря, пов'язані із військовою активністю. До основних факторів негативного впливу належать вибухи боєприпасів, пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, горіння нафтопродуктів, руйнування житлових і промислових будівель, функціонування військової техніки та збільшення обсягів неорганізованих викидів пилу. У процесі руйнування будівель у повітря потрапляють частинки бетону, азбесту, важких металів та інших токсичних компонентів [18, 20].

Особливо небезпечними є викиди дрібнодисперсного пилу фракцій PM10 та PM2.5, які здатні проникати у дихальну систему людини та спричиняти захворювання органів дихання, серцево-судинної системи та онкологічні патології. В умовах бойових дій також збільшується концентрація продуктів неповного згоряння палива, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, діоксинів та інших токсичних сполук, що мають високий рівень екологічної небезпеки.

Транспортний сектор Херсона також залишається одним із вагомих джерел забруднення атмосферного повітря. Попри скорочення цивільного транспортного потоку в окремі періоди бойових дій, інтенсивне використання військової техніки, дизельних генераторів та спеціалізованого транспорту супроводжується значними викидами оксидів азоту, оксиду вуглецю, сажі та летких органічних сполук. Додатковим фактором негативного впливу є пошкодження дорожнього покриття, що сприяє підвищенню рівня запиленості повітря.

Отже, місто Херсон у сучасних умовах характеризується складною екологічною ситуацією, сформованою поєднанням природних, кліматичних,

промислових та воєнно-техногенних факторів. Географічне положення, особливості клімату та структура господарського комплексу визначають специфіку формування якості атмосферного повітря та створюють необхідність проведення постійного екологічного моніторингу для оцінки рівня забруднення і розробки ефективних природоохоронних заходів.

1.3.1 Вплив кліматичних змін на формування якості атмосферного повітря в Херсонській області

Кліматичні зміни є одним із важливих факторів, що впливають на формування якості атмосферного повітря та екологічний стан територій. Для Херсонської області, яка розташована в степовій зоні півдня України, прояви сучасних кліматичних змін є особливо відчутними через поєднання природних особливостей регіону та значного антропогенного навантаження. В останні десятиліття на території області спостерігається тенденція до підвищення середньорічної температури повітря, зменшення кількості атмосферних опадів, збільшення тривалості посушливих періодів та зростання частоти екстремальних погодних явищ. Такі зміни безпосередньо впливають на процеси утворення, накопичення та поширення забруднювальних речовин у атмосферному повітрі.

Однією з найбільш характерних ознак зміни клімату є підвищення середньорічної температури повітря. За даними багаторічних спостережень, середня температура в південних регіонах України поступово зростає, що призводить до збільшення тривалості спекотного періоду та кількості днів із температурою понад +30 °С. Для Херсонської області така тенденція має особливе значення, оскільки високі температури сприяють інтенсифікації фотохімічних процесів у атмосфері. Під впливом сонячного випромінювання відбувається взаємодія оксидів азоту та летких органічних сполук, у результаті чого утворюється приземний озон та фотохімічний смог. Дані вторинні забруднювачі негативно впливають на здоров'я населення, спричиняючи

подразнення слизових оболонок, погіршення функціонування органів дихання та підвищення ризику серцево-судинних захворювань.

Підвищення температури повітря також сприяє збільшенню випаровування вологи з поверхні ґрунту та водних об'єктів. У результаті цього спостерігається зростання дефіциту вологи, що є однією з причин посилення посушливих процесів у регіоні. Херсонська область традиційно належить до найбільш посушливих територій України, а зміна клімату додатково підсилює цей процес. Тривалі посухи призводять до деградації ґрунтового покриву, втрати рослинності та збільшення площ відкритих земельних ділянок, які стають джерелом пилового забруднення атмосферного повітря.

Зменшення кількості атмосферних опадів також негативно впливає на якість повітря. Атмосферні опади відіграють важливу роль у природному очищенні атмосфери, оскільки сприяють осадженню пилу та газоподібних забруднювачів. За умов недостатньої кількості опадів процеси самоочищення атмосфери сповільнюються, що призводить до накопичення забруднювальних речовин у приземному шарі повітря. Особливо небезпечними є періоди тривалої бездошової погоди, коли концентрація дрібнодисперсних частинок PM10 та PM2.5 може суттєво зростати.

Одним із найбільш характерних наслідків кліматичних змін для південних регіонів України є збільшення частоти пилових бур. Такі явища виникають унаслідок поєднання сильних вітрів, пересушеного ґрунту та недостатнього рослинного покриву. У Херсонській області ризик виникнення пилових бур додатково посилюється внаслідок руйнування земельних ресурсів під час бойових дій. Вибухи, переміщення важкої військової техніки, руйнування дорожнього покриття та інфраструктури призводять до підняття значної кількості пилу в атмосферу. Під дією вітру пилові маси можуть переноситися на десятки кілометрів, погіршуючи якість повітря не лише в межах окремих населених пунктів, а й на території всієї області.

Суттєвий вплив на якість атмосферного повітря мають також природні пожежі, частота яких зростає в умовах зміни клімату. Підвищення температури

повітря, тривалі посухи та зменшення вологості рослинності створюють сприятливі умови для виникнення та швидкого поширення пожеж у степових і лісових екосистемах. У воєнний період ризик пожеж значно підвищується через обстріли, вибухи боєприпасів та руйнування об'єктів інфраструктури. Під час горіння рослинності в атмосферу потрапляють великі обсяги оксиду вуглецю, оксидів азоту, дрібнодисперсного пилу та канцерогенних органічних сполук. Такі викиди можуть суттєво погіршувати якість повітря та створювати додаткові ризики для здоров'я населення.

Важливою особливістю кліматичних змін є також збільшення кількості екстремальних погодних явищ, серед яких сильні вітри, суховії та хвилі спеки. Такі явища сприяють інтенсивнішому перенесенню забруднювальних речовин на значні відстані. У результаті навіть локальні джерела забруднення можуть впливати на якість атмосферного повітря в інших районах області. Особливо актуально це для забруднювачів, які утворюються внаслідок бойових дій, пожеж та руйнування промислових об'єктів.

Таким чином, кліматичні зміни є важливим фактором формування якості атмосферного повітря в Херсонській області. Підвищення температури повітря, зменшення кількості опадів, збільшення тривалості посух, зростання частоти пилових бур та природних пожеж сприяють погіршенню екологічного стану атмосферного повітря. В умовах воєнного стану вплив кліматичних змін посилюється додатковими джерелами забруднення, пов'язаними з бойовими діями, що потребує врахування кліматичних факторів під час оцінки екологічних ризиків та розроблення заходів щодо відновлення якості атмосферного повітря.

1.4. Основні забруднюючі речовини та їх характеристика

Атмосферне повітря в умовах бойових дій зазнає значного негативного впливу внаслідок утворення великої кількості забруднювальних речовин різного походження. Для міста Херсон характерним є поєднання традиційних джерел антропогенного забруднення з новими воєнно-техногенними факторами, що виникли внаслідок активних бойових дій, руйнування інфраструктури, пожеж та застосування вибухових речовин. У сучасних умовах якість атмосферного повітря визначається концентраціями як газоподібних домішок, так і твердих аерозольних частинок, багато з яких мають токсичні, канцерогенні та мутагенні властивості.



Рис. 1.5 Карта районів бойових дій і потенційного забруднення повітря м. Херсон

Одними з найбільш поширених забруднювальних речовин є тверді завислі частинки, зокрема пил фракцій PM10 та PM2.5. Дані частинки мають діаметр менше 10 мкм та 2,5 мкм відповідно, що дозволяє їм тривалий час перебувати у повітрі та проникати глибоко у дихальну систему людини. Основними джерелами утворення пилу в умовах бойових дій є руйнування

житлових і промислових будівель, вибухи боєприпасів, пожежі, пересування військової техніки та руйнування дорожнього покриття. До складу пилу можуть входити частинки цементу, бетону, скла, сажі, металів, мінеральних домішок та продуктів горіння. Особливу небезпеку становлять дрібнодисперсні частинки PM_{2.5}, які здатні проникати через альвеоли легень у кровоносну систему, викликаючи захворювання органів дихання, серцево-судинної системи та підвищуючи ризик онкологічних патологій.

Важливим компонентом забруднення атмосферного повітря є оксид вуглецю (CO), який утворюється внаслідок неповного згоряння органічного палива. Основними джерелами надходження оксиду вуглецю до атмосфери є пожежі, вибухи, робота двигунів внутрішнього згоряння, функціонування військової техніки, дизельних генераторів та спалювання паливно-мастильних матеріалів. Оксид вуглецю є безбарвним газом без запаху, який має високу токсичність через здатність зв'язуватися з гемоглобіном крові та порушувати транспортування кисню в організмі людини. За підвищених концентрацій він може спричиняти кисневе голодування, порушення функціонування центральної нервової системи та серцево-судинні розлади.

Суттєву небезпеку для атмосферного повітря становлять оксиди азоту (NO та NO₂), які утворюються під час високотемпературних процесів горіння. Основними джерелами їх утворення є вибухи боєприпасів, пожежі, функціонування транспортних засобів, електрогенераторів та військової техніки. Діоксид азоту має виражену токсичну дію на організм людини, подразнює слизові оболонки дихальних шляхів, сприяє розвитку бронхолегеневих захворювань та бере участь у формуванні фотохімічного смогу. Крім того, оксиди азоту взаємодіють із водяною парою атмосфери, утворюючи азотну кислоту, що є складовою кислотних опадів.

Одним із характерних забруднювачів повітряного басейну є діоксид сірки (SO₂), який утворюється внаслідок згоряння сірковмісного палива, нафтопродуктів та горіння промислових матеріалів. У період бойових дій значні обсяги діоксиду сірки можуть надходити в атмосферу під час пожеж на

складах паливно-мастильних матеріалів, промислових об'єктах та енергетичній інфраструктурі. Діоксид сірки негативно впливає на органи дихання, викликає подразнення слизових оболонок та може сприяти розвитку хронічних захворювань легень. У поєднанні з атмосферною вологою він утворює сірчисту та сірчану кислоти, що призводить до виникнення кислотних дощів і деградації природних екосистем.

Значну роль у погіршенні стану атмосферного повітря відіграють леткі органічні сполуки. До цієї групи належать бензол, толуол, ксилол, формальдегід та інші токсичні органічні речовини, які виділяються під час горіння палива, пластмас, лакофарбових матеріалів, полімерів та будівельних конструкцій. Умови бойових дій супроводжуються масовими пожежами житлових будівель, транспортних засобів та інфраструктурних об'єктів, унаслідок чого концентрація летких органічних сполук у повітрі суттєво зростає. Багато з цих речовин мають канцерогенні властивості та негативно впливають на центральну нервову систему, печінку та органи дихання.

Особливу небезпеку становлять поліциклічні ароматичні вуглеводні, які утворюються внаслідок неповного згоряння органічних матеріалів. Найбільш відомим представником цієї групи є бенз(а)пірен — високотоксична канцерогенна речовина, здатна накопичуватися в організмі людини та викликати мутагенні зміни. Основними джерелами поліциклічних ароматичних вуглеводнів є пожежі нафтопродуктів, спалювання деревини, гуми, пластмас та інших матеріалів унаслідок бойових дій.

Унаслідок руйнування промислових підприємств, будівель та інженерної інфраструктури в атмосферне повітря можуть потрапляти важкі метали, зокрема свинець, кадмій, ртуть, нікель, хром та мідь. Дані речовини надходять у вигляді аерозолів та пилу і характеризуються високою токсичністю навіть за незначних концентрацій. Важкі метали здатні накопичуватися у ґрунтах, водних об'єктах та живих організмах, порушуючи функціонування нервової, імунної та репродуктивної систем людини. Джерелами надходження важких

металів можуть бути уламки боєприпасів, продукти горіння техніки, руйнування металоконструкцій та діяльність транспортних засобів.

У сучасних умовах значну увагу приділяють також вторинним забруднювачам атмосферного повітря, зокрема приземному озону. Озон у приземному шарі атмосфери утворюється внаслідок фотохімічних реакцій між оксидами азоту та леткими органічними сполуками під дією сонячного випромінювання. Для південних регіонів України, зокрема Херсонської області, проблема формування фотохімічного смогу є особливо актуальною у літній період через високі температури та інтенсивну сонячну радіацію. Підвищені концентрації озону негативно впливають на органи дихання, викликають подразнення слизових оболонок та знижують стійкість організму до інфекційних захворювань.

Вданій структура забруднення атмосферного повітря в умовах бойових дій характеризується комплексним поєднанням пилових, газоподібних та токсичних органічних речовин, джерела яких пов'язані як із традиційною господарською діяльністю, так і з воєнно-техногенними процесами. Найбільш небезпечними для населення є дрібнодисперсний пил, оксиди азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки, леткі органічні сполуки, поліциклічні ароматичні вуглеводні та важкі метали. Їх надходження до атмосферного повітря створює суттєві ризики для здоров'я населення та природних екосистем, що обумовлює необхідність проведення систематичного екологічного моніторингу та розробки ефективних заходів із мінімізації негативного впливу забруднення атмосфери.

1.5. Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення

Забруднення атмосферного повітря є одним із найнебезпечніших факторів негативного впливу на здоров'я населення, особливо в умовах бойових дій, коли рівень техногенного навантаження суттєво зростає. Для міста Херсон проблема погіршення якості атмосферного повітря набула особливої актуальності у зв'язку з руйнуванням промислових об'єктів, житлової інфраструктури, виникненням масштабних пожеж, вибухами боєприпасів та інтенсивним використанням військової техніки. Внаслідок цього в атмосферу надходить значна кількість токсичних речовин, які негативно впливають на організм людини та можуть спричиняти як гострі, так і хронічні захворювання.

Атмосферне повітря є основним середовищем життєдіяльності людини, а тому його якісний стан безпосередньо визначає рівень екологічної безпеки населення. Забруднювальні речовини потрапляють до організму переважно через органи дихання, а дрібнодисперсні частинки здатні проникати навіть у кровоносну систему та внутрішні органи. Умови воєнного часу значно ускладнюють ситуацію, оскільки вплив шкідливих речовин часто поєднується зі стресом, недостатнім медичним забезпеченням, порушенням санітарних умов та загальним погіршенням соціально-економічного стану населення.

Одним із найбільш небезпечних забруднювачів атмосферного повітря є дрібнодисперсний пил PM10 та PM2.5. Частинки розміром менше 10 мкм здатні проникати у верхні дихальні шляхи, тоді як частинки менше 2,5 мкм проникають безпосередньо в альвеоли легень і можуть потрапляти до крові. В умовах бойових дій джерелами таких частинок є руйнування будівель, пожежі, вибухи, горіння паливно-мастильних матеріалів та пересування військової техніки. Вплив дрібнодисперсного пилу пов'язаний із розвитком бронхіальної астми, хронічного бронхіту, пневмонії, серцево-судинних захворювань та онкологічних патологій. Особливо вразливими до впливу пилових частинок є діти, люди похилого віку та особи із хронічними захворюваннями органів дихання.

Суттєву небезпеку для здоров'я населення становить оксид вуглецю, який утворюється внаслідок неповного згоряння палива та вибухових процесів. Оксид вуглецю є токсичним газом без кольору та запаху, який здатний швидко накопичуватися у повітрі, особливо в умовах пожеж або недостатньої вентиляції. Потрапляючи до організму, він зв'язується з гемоглобіном крові та утворює карбоксигемоглобін, що перешкоджає транспортуванню кисню до тканин. У результаті виникає кисневе голодування організму, яке супроводжується головним болем, запамороченням, слабкістю, порушенням роботи серцево-судинної та нервової систем. За високих концентрацій оксид вуглецю може призводити до втрати свідомості та смертельних випадків.

Негативний вплив на організм людини мають також оксиди азоту, які активно утворюються під час вибухів, горіння палива та роботи транспортних засобів. Діоксид азоту подразнює слизові оболонки дихальних шляхів, викликає кашель, задишку та зниження функції легень. Тривалий вплив оксидів азоту сприяє розвитку хронічних захворювань дихальної системи, зниженню імунітету та підвищенню чутливості організму до інфекцій. У поєднанні з іншими забруднювачами оксиди азоту беруть участь у формуванні фотохімічного смогу, який додатково погіршує стан атмосферного повітря та створює небезпеку для населення.

Діоксид сірки також належить до небезпечних атмосферних забруднювачів, що негативно впливають на здоров'я людини. Його джерелами є пожежі на промислових об'єктах, горіння палива та руйнування інфраструктури. Діоксид сірки подразнює слизові оболонки очей та органів дихання, викликає бронхоспазми, утруднене дихання та загострення хронічних захворювань легень. Особливо небезпечним є поєднання діоксиду сірки з дрібнодисперсним пилом, оскільки така комбінація значно підвищує токсичний ефект на організм людини.

Унаслідок горіння пластмас, паливно-мастильних матеріалів, синтетичних речовин та будівельних матеріалів до атмосферного повітря надходять леткі органічні сполуки та поліциклічні ароматичні вуглеводні.

Багато з цих речовин мають канцерогенні властивості та можуть накопичуватися в організмі людини. Найбільш небезпечним представником цієї групи є бенз(а)пірен, який здатний викликати мутагенні зміни клітин та розвиток онкологічних захворювань. Тривалий вплив органічних токсикантів також негативно впливає на нервову систему, печінку, нирки та імунну систему людини.

Особливу небезпеку в умовах бойових дій становлять важкі метали, які потрапляють у атмосферне повітря під час вибухів, руйнування техніки, металоконструкцій та промислових об'єктів. Свинець, кадмій, ртуть та інші токсичні елементи можуть накопичуватися у тканинах організму та викликати серйозні порушення роботи нервової, серцево-судинної та репродуктивної систем. Важкі метали характеризуються високою токсичністю навіть за незначних концентрацій та мають здатність до біоаккумуляції, що підсилює їх негативний вплив на здоров'я населення.

В умовах тривалих бойових дій значно підвищується психоемоційне навантаження на населення, а забруднення атмосферного повітря додатково посилює негативний вплив на організм. Постійне перебування у забрудненому середовищі сприяє зниженню імунітету, підвищенню ризику серцево-судинних патологій, розвитку хронічної втоми та порушень нервової системи. Особливо небезпечним є комбінований вплив декількох забруднювальних речовин одночасно, оскільки в таких випадках токсичний ефект може значно посилюватися.

Наслідки забруднення атмосферного повітря мають не лише медичний, а й соціально-економічний характер. Погіршення стану здоров'я населення призводить до зростання рівня захворюваності, збільшення витрат на медичне обслуговування, зниження працездатності населення та погіршення демографічної ситуації. У регіонах, які перебувають у зоні активних бойових дій, проблема екологічної безпеки атмосферного повітря стає одним із ключових факторів забезпечення нормальних умов життєдіяльності населення.

Забруднення атмосферного повітря є одним із ключових факторів деградації навколишнього природного середовища, оскільки атмосферні процеси тісно пов'язані з функціонуванням усіх компонентів екосистем. В умовах бойових дій негативний вплив на довкілля суттєво посилюється через масштабні руйнування інфраструктури, пожежі, вибухи боєприпасів та неконтрольоване надходження токсичних речовин у навколишнє середовище. Для міста Херсон проблема забруднення атмосферного повітря має комплексний характер і супроводжується погіршенням стану ґрунтів, водних ресурсів, рослинного та тваринного світу.

Атмосферне повітря виконує важливу функцію перенесення та розсіювання забруднювальних речовин, унаслідок чого токсичні компоненти можуть поширюватися на значні території. Частинки пилу, оксиди азоту, діоксид сірки, важкі метали та органічні токсиканти осідають на поверхню ґрунтів, рослинності та водних об'єктів, викликаючи їх вторинне забруднення. У результаті формується комплексний негативний вплив на екосистеми, який проявляється у порушенні природних біогеохімічних процесів та деградації компонентів довкілля [2, 3, 13, 15].

Одним із найбільш помітних наслідків атмосферного забруднення є погіршення стану ґрунтів. В умовах бойових дій у атмосферу надходить велика кількість пилу та токсичних аерозолів, що містять важкі метали, продукти згоряння та хімічні сполуки вибухових речовин. Після осідання на поверхню ґрунту ці речовини накопичуються у верхніх горизонтах та змінюють фізико-хімічні властивості ґрунтового покриву. Особливо небезпечними є свинець, кадмій, ртуть та інші токсичні елементи, які здатні тривалий час зберігатися у ґрунті та включатися до харчових ланцюгів.

Значної шкоди забруднення атмосферного повітря завдає рослинному покриву. Токсичні гази та пил осідають на поверхні листків і порушують процеси фотосинтезу, газообміну та водного балансу рослин. Підвищені концентрації діоксиду сірки, оксидів азоту та озону викликають пошкодження клітинних структур рослинних тканин, пригнічують ріст та розвиток рослин і

можуть призводити до передчасного всихання зелених насаджень. Умови бойових дій супроводжуються також масштабними пожежами лісових та степових екосистем, що спричиняє знищення природної рослинності та втрату біорізноманіття.

Для Херсонського регіону особливо актуальною є проблема деградації степових екосистем, які характеризуються високою чутливістю до антропогенного впливу. Унаслідок пожеж, вибухів та забруднення атмосферного повітря відбувається руйнування рослинного покриву, зниження біологічної продуктивності територій та активізація процесів ерозії ґрунтів. Знищення природної рослинності призводить до порушення екологічної рівноваги та погіршення умов існування багатьох видів тварин.

Негативний вплив атмосферного забруднення поширюється також на водні екосистеми. Забруднювальні речовини, що містяться у повітрі, поступово осідають на поверхню річок, озер та лиманів разом із атмосферними опадами або сухим осадженням. У результаті до водних об'єктів потрапляють важкі метали, сполуки азоту та сірки, нафтопродукти та органічні токсиканти. Для території Херсона особливе значення має вплив забруднення на екосистему річки Дніпро та Дніпровсько-Бузького лиману, які є важливими природними та господарськими об'єктами регіону.

Одним із небезпечних наслідків атмосферного забруднення є формування кислотних опадів. Оксиди азоту та діоксид сірки, потрапляючи в атмосферу, взаємодіють із водяною парою та утворюють кислоти, які випадають на поверхню землі разом із дощем або снігом. Кислотні опади призводять до закислення ґрунтів і водойм, погіршення стану рослинності та зниження біологічної продуктивності екосистем. Крім того, вони прискорюють процеси корозії металевих конструкцій та руйнування будівельних матеріалів.

Суттєвої шкоди атмосферне забруднення завдає тваринному світу. Погіршення стану середовища існування, знищення рослинності, забруднення водних ресурсів та накопичення токсичних речовин у харчових ланцюгах негативно впливають на популяції диких тварин та птахів. Особливо

небезпечним є накопичення важких металів та органічних токсикантів у тканинах живих організмів, що може спричиняти порушення репродуктивної функції, зниження життєздатності популяцій та загибель окремих видів.

В умовах бойових дій значно погіршується загальний екологічний стан урбанізованих територій. Руйнування зелених зон, пошкодження інженерної інфраструктури, накопичення будівельних відходів та забруднення атмосферного повітря сприяють формуванню несприятливого міського середовища. У Херсоні додатковим фактором негативного впливу є тривале порушення нормального функціонування систем комунального господарства та природоохоронної інфраструктури.

Важливою екологічною проблемою є також здатність забруднювальних речовин до тривалої міграції та накопичення у природних компонентах. Багато токсичних речовин не руйнуються швидко в природному середовищі та можуть залишатися небезпечними протягом тривалого часу. Це створює ризики довгострокового погіршення екологічного стану територій навіть після завершення активної фази бойових дій.

1.6. Нормативно-правове забезпечення контролю якості атмосферного повітря в Україні

Система нормативно-правового забезпечення контролю якості атмосферного повітря в Україні є важливою складовою державної екологічної політики та спрямована на забезпечення екологічної безпеки, охорону здоров'я населення і збереження природного середовища. В умовах сучасних екологічних викликів, пов'язаних із техногенним навантаженням та наслідками бойових дій, питання правового регулювання у сфері охорони атмосферного повітря набувають особливої актуальності. Законодавча база України у цій сфері формується на основі Конституції України, законів, кодексів, постанов Кабінету Міністрів України, державних стандартів, санітарних норм та міжнародних екологічних зобов'язань держави.

Основою правового регулювання екологічної безпеки є Конституція України, відповідно до якої кожен громадянин має право на безпечне для життя і здоров'я довкілля та на відшкодування шкоди, завданої порушенням цього права. Конституційні положення визначають загальні принципи державної політики у сфері охорони навколишнього природного середовища та створюють правову основу для функціонування системи екологічного контролю.

Базовим нормативно-правовим актом у сфері охорони атмосферного повітря є Закон України «Про охорону атмосферного повітря», який визначає правові та організаційні засади забезпечення екологічної безпеки у сфері атмосферного повітря. Закон регулює діяльність, пов'язану із викидами забруднювальних речовин в атмосферу, встановлює вимоги до підприємств, установ та організацій щодо дотримання нормативів екологічної безпеки, а також визначає систему державного моніторингу атмосферного повітря. Основними завданнями закону є запобігання шкідливому впливу забруднення атмосфери на здоров'я населення та довкілля, забезпечення раціонального використання атмосферного повітря та зниження рівнів забруднення.

Важливе значення у сфері охорони атмосферного повітря має Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», який визначає загальні принципи державної екологічної політики та механізми екологічного контролю. Закон регламентує права та обов'язки громадян і суб'єктів господарювання у сфері природокористування, встановлює основи екологічного моніторингу, оцінки впливу на довкілля та державного екологічного нагляду.

Одним із ключових механізмів забезпечення екологічної безпеки є система нормативів якості атмосферного повітря. В Україні застосовуються гранично допустимі концентрації забруднювальних речовин у повітрі населених місць, які визначають максимально допустимий вміст шкідливих речовин, безпечний для здоров'я населення. Гранично допустимі концентрації встановлюються для оксиду вуглецю, діоксиду сірки, оксидів азоту, пилу, формальдегіду, бенз(а)пірену, важких металів та інших небезпечних речовин. Дані нормативи використовуються під час проведення екологічного моніторингу та оцінки стану атмосферного повітря.

Суттєве значення для регулювання діяльності підприємств мають нормативи гранично допустимих викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами. Ці нормативи визначають максимально допустимі обсяги викидів для кожного конкретного підприємства з урахуванням технологічних процесів, особливостей виробництва та екологічного стану території. Викиди забруднювальних речовин допускаються лише за наявності відповідного дозволу, який видається уповноваженими органами державної влади.

Важливу роль у системі контролю якості атмосферного повітря відіграє державний моніторинг довкілля. Правові засади функціонування системи моніторингу визначаються постановами Кабінету Міністрів України та нормативними документами Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. Система моніторингу передбачає проведення регулярних спостережень за станом атмосферного повітря, визначення концентрацій

забруднювальних речовин, оцінку тенденцій зміни якості повітря та прогнозування можливих екологічних ризиків.

У сучасних умовах важливого значення набуває адаптація українського законодавства до екологічних вимог Європейський Союз. Україна поступово впроваджує положення європейських директив у сфері охорони атмосферного повітря, зокрема щодо оцінки якості повітря, контролю промислових викидів та скорочення негативного впливу забруднення на здоров'я населення. Одним із важливих напрямів є гармонізація національних стандартів із вимогами європейського екологічного законодавства та вдосконалення системи екологічного моніторингу.

Особливе місце у системі нормативно-правового забезпечення займають санітарні норми та правила, які регламентують допустимі рівні забруднення атмосферного повітря та вимоги до санітарно-захисних зон підприємств. Дані нормативи спрямовані на забезпечення безпечних умов проживання населення та попередження негативного впливу забруднення атмосфери на здоров'я людини.

У зв'язку з бойовими діями та масштабними руйнуваннями інфраструктури виникла необхідність удосконалення правових механізмів оцінки екологічної шкоди, завданої воєнними діями. Сучасна система екологічного законодавства України передбачає можливість фіксації фактів забруднення довкілля внаслідок воєнних дій, проведення розрахунків екологічних збитків та визначення масштабів шкоди, заподіяної атмосферному повітрю, водним ресурсам, ґрунтам та екосистемам. Особливу увагу приділяють документуванню випадків забруднення атмосферного повітря внаслідок пожеж, вибухів, руйнування промислових підприємств та інших воєнно-техногенних процесів.

Контроль за дотриманням вимог природоохоронного законодавства здійснюють уповноважені державні органи, зокрема Державна екологічна інспекція України, органи санітарно-епідеміологічного контролю, місцеві органи виконавчої влади та інші установи, відповідальні за екологічну безпеку.

До основних форм контролю належать перевірки підприємств, лабораторні дослідження, моніторингові спостереження та оцінка дотримання встановлених екологічних нормативів.

Таким чином, нормативно-правове забезпечення контролю якості атмосферного повітря в Україні є складною багаторівневою системою, яка включає законодавчі, нормативні, санітарні та організаційні механізми екологічного регулювання. Основними завданнями цієї системи є забезпечення екологічної безпеки населення, зниження рівня атмосферного забруднення, здійснення державного моніторингу та контроль за дотриманням природоохоронного законодавства. В умовах бойових дій ефективність нормативно-правового регулювання набуває особливого значення, оскільки саме від функціонування системи екологічного контролю залежить можливість своєчасного виявлення небезпечних змін у стані атмосферного повітря та мінімізації негативних наслідків для населення і довкілля [2, 3, 13, 15].

РОЗДІЛ II. АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ТА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

2.1. Загальна характеристика району дослідження

Місто Херсон є адміністративним центром Херсонської області та одним із важливих промислових, транспортних і портових центрів півдня України. У сучасних умовах місто перебуває у зоні підвищеного техногенного та воєнного навантаження, що суттєво впливає на екологічний стан території, зокрема на якість атмосферного повітря. Аналіз стану атмосферного повітря в умовах бойових дій потребує комплексного врахування природних, кліматичних, господарських та соціально-економічних особливостей регіону, оскільки саме вони визначають характер формування та поширення забруднення в атмосфері.

Херсон розташований у південній частині України в межах Причорноморської низовини на правому березі річки Дніпро, поблизу Дніпровсько-Бузького лиману та узбережжя Чорного моря. Географічне положення міста є важливим фактором формування місцевих кліматичних умов та особливостей циркуляції повітряних мас. Територія характеризується переважно рівнинним рельєфом із незначними перепадами висот, що створює умови для активного переміщення повітряних потоків та перенесення забруднювальних речовин на значні відстані.

Природні умови регіону значною мірою визначаються степовим характером території. Для Херсонщини характерні відкриті ландшафти, невисока лісистість та значна площа сільськогосподарських угідь. Унаслідок обмеженої кількості природних бар'єрів пилові та газоподібні забруднювачі можуть швидко поширюватися як у межах міста, так і на прилеглі території. Особливо це проявляється в умовах бойових дій, коли додатковими джерелами пилу стають руйнування будівель, дорожнього покриття та інфраструктурних об'єктів.

Клімат міста є помірно континентальним із вираженими ознаками посушливого степового клімату. Для регіону характерне тривале спекотне літо та відносно м'яка малосніжна зима. Середньорічна температура повітря становить близько $+11\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в літній період температура нерідко перевищує $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Річна кількість атмосферних опадів є недостатньою та коливається в межах 350–450 мм. Низька вологість повітря та високі температури сприяють інтенсивному утворенню пилу та накопиченню забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери [18, 32, 33, 36].

Важливу роль у формуванні стану атмосферного повітря відіграє вітровий режим. Для території Херсона характерними є переважно північні та північно-східні вітри із середньою швидкістю 4–6 м/с. У періоди сильного вітру забруднювальні речовини можуть переноситися на значні відстані, що ускладнює локалізацію джерел забруднення. Разом із тим у періоди штилю або температурних інверсій спостерігається накопичення токсичних домішок у приземному шарі атмосфери, що призводить до погіршення якості повітря та підвищення ризиків для здоров'я населення.

До початку повномасштабних бойових дій Херсон був важливим промисловим і транспортним центром регіону. У структурі господарства провідне місце займали суднобудування, машинобудування, харчова промисловість, енергетика та транспортна інфраструктура. Значний вплив на екологічний стан атмосферного повітря здійснювали автотранспорт, портова діяльність, комунально-енергетичний сектор та промислові підприємства. Основними забруднювальними речовинами були оксиди азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, пил та леткі органічні сполуки.

Унаслідок бойових дій структура джерел атмосферного забруднення суттєво змінилася. Значна частина промислових об'єктів була пошкоджена або припинила функціонування, однак водночас виникли нові потужні джерела техногенного навантаження. До них належать вибухи боєприпасів, пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, руйнування житлових будівель, горіння паливно-мастильних матеріалів та активне використання військової техніки. У

наслідок цих процесів у повітря надходять значні обсяги пилу, сажі, оксидів азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки, важких металів та канцерогенних органічних сполук.

Особливу екологічну небезпеку становлять пожежі, що виникають унаслідок обстрілів та руйнування інфраструктури. Горіння нафтопродуктів, пластмас, синтетичних матеріалів та будівельних конструкцій супроводжується утворенням великої кількості токсичних речовин, серед яких бенз(а)пірен, формальдегід, діоксини та інші небезпечні сполуки [21, 22, 24]. В умовах високих температур та недостатньої вентиляції атмосфери ці речовини можуть накопичуватися у приземному шарі повітря та створювати серйозну загрозу для населення [32, 33, 34, 45].

Значний вплив на стан атмосферного повітря здійснює транспортний сектор. Під час бойових дій збільшується використання військової техніки, дизельних генераторів та спеціалізованого транспорту, що супроводжується інтенсивними викидами вихлопних газів. Руйнування дорожнього покриття та будівель додатково сприяє підвищенню рівня запиленості міського середовища.

У сучасних умовах екологічний стан Херсона характеризується поєднанням традиційного антропогенного забруднення та воєнно-техногенних факторів. Формування складної багатокомпонентної системи атмосферного забруднення створює значні ризики для здоров'я населення та навколишнього природного середовища. Особливо небезпечним є тривалий вплив дрібнодисперсного пилу, токсичних газів та важких металів, які можуть накопичуватися в екосистемах і викликати довгострокові негативні наслідки.

Для кількісної оцінки стану атмосферного повітря в місті Херсон доцільно використати розрахунок індексу забруднення атмосфери, який дає змогу узагальнити вплив кількох основних забруднювальних речовин та визначити рівень екологічної небезпеки повітряного середовища. Такий підхід є зручним для аналізу територій, де на якість повітря одночасно впливають транспортні викиди, промислові джерела, пожежі, вибухи, руйнування будівель та інші наслідки бойових дій.

Для розрахунку використовують співвідношення фактичної концентрації забруднювальної речовини до її гранично допустимої концентрації:

$$\frac{C_i}{ГДК_i}$$

де

C_i — фактична або умовно прийнята середньодобова концентрація забруднювальної речовини в атмосферному повітрі, мг/м³;

ГДК_i — гранично допустима концентрація цієї речовини, мг/м³.

(2.1)

Для прикладу розрахунку обрано найбільш характерні забруднювачі атмосферного повітря в умовах бойових дій: пил, діоксид азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю та формальдегід.

Умовні вихідні дані для розрахунку:

Пил: фактична концентрація — 0,25 мг/м³, ГДК — 0,15 мг/м³.

Діоксид азоту: фактична концентрація — 0,08 мг/м³, ГДК — 0,04 мг/м³.

Діоксид сірки: фактична концентрація — 0,07 мг/м³, ГДК — 0,05 мг/м³.

Оксид вуглецю: фактична концентрація — 4,0 мг/м³, ГДК — 3,0 мг/м³.

Формальдегід: фактична концентрація — 0,015 мг/м³, ГДК — 0,003 мг/м³.

Розрахуємо кратність перевищення для кожної речовини.

Для пилу:

$$0,25 / 0,15 = 1,67.$$

Отже, концентрація пилу перевищує допустимий рівень у 1,67 рази.

Для діоксиду азоту:

$$0,08 / 0,04 = 2,0.$$

Отже, концентрація діоксиду азоту перевищує гранично допустимий рівень у 2 рази.

Для діоксиду сірки:

$$0,07 / 0,05 = 1,4.$$

Отже, концентрація діоксиду сірки перевищує допустимий рівень у 1,4 рази.

Для оксиду вуглецю:

$$4,0 / 3,0 = 1,33.$$

Отже, концентрація оксиду вуглецю перевищує норматив у 1,33 рази.

Для формальдегіду:

$$0,015 / 0,003 = 5,0.$$

Отже, концентрація формальдегіду перевищує гранично допустимий рівень у 5 разів.

Загальний умовний індекс забруднення атмосферного повітря можна визначити як суму отриманих відношень:

$$ІЗА = 1,67 + 2,0 + 1,4 + 1,33 + 5,0 = 11,4.$$

Отримане значення індексу забруднення атмосфери становить 11,4, що свідчить про високий рівень забруднення атмосферного повітря. Найбільший внесок у загальний показник має формальдегід, перевищення якого становить 5 разів, а також діоксид азоту та пил. Це пояснюється тим, що в умовах бойових дій значна кількість забруднювальних речовин утворюється внаслідок пожеж, вибухів, руйнування будівельних конструкцій, горіння полімерних матеріалів, пального та роботи військової техніки.

Результати розрахунку показують, що атмосферне повітря в умовах бойових дій може характеризуватися підвищеним рівнем екологічної небезпеки. Особливо небезпечними є дрібнодисперсний пил, оксиди азоту та органічні токсиканти, оскільки вони мають прямий негативний вплив на органи дихання, серцево-судинну систему та загальний стан здоров'я населення. Високе значення індексу забруднення атмосфери підтверджує необхідність посилення екологічного моніторингу в місті Херсон, проведення регулярних лабораторних вимірювань та розробки заходів щодо зниження негативного впливу забруднення на населення і довкілля.

2.2. Основні джерела забруднення атмосферного повітря внаслідок бойових дій з розрахунками

В умовах сучасних бойових дій атмосферне повітря зазнає значного негативного впливу внаслідок утворення великої кількості забруднювальних речовин різного походження. Для міста Херсон основними джерелами забруднення атмосфери є вибухи боєприпасів, пожежі на об'єктах інфраструктури, робота військової техніки, руйнування будівель та дорожнього покриття, а також горіння паливно-мастильних матеріалів. У результаті цих процесів у повітря надходять оксиди азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки, дрібнодисперсний пил, сажа, важкі метали та канцерогенні органічні сполуки.

Одним із найпотужніших джерел забруднення атмосферного повітря є вибухи боєприпасів. Під час детонації вибухових речовин утворюються високотемпературні газові суміші, до складу яких входять оксиди азоту, оксид вуглецю та тверді аерозольні частинки. Для орієнтовної оцінки маси викидів оксидів азоту використовується залежність:

$$M_{NOx} = m \cdot k$$

де

M_{NOx} — маса оксиду вуглецю, кг;

V — маса палива, що згоріла, кг;

q — питомий коефіцієнт утворення оксиду вуглецю, кг/кг палива.

(2.2)

Для артилерійського боєприпасу масою вибухової речовини 8 кг та коефіцієнта утворення оксидів азоту 0,18 кг/кг отримаємо:

$$M_{NOx} = 8 \cdot 0,18 = 1,44 \text{ кг}$$

Отже, один вибух артилерійського снаряда може супроводжуватися утворенням близько 1,44 кг оксидів азоту. За умов масованих обстрілів сумарний обсяг викидів зростає у десятки разів.

Значним джерелом забруднення є пожежі нафтопродуктів та паливно-мастильних матеріалів. У процесі горіння дизельного палива утворюються оксид вуглецю, сажа, діоксид сірки та леткі органічні сполуки. Орієнтовний розрахунок маси оксиду вуглецю визначається за формулою:

$$M_{CO} = B \cdot q$$

де

M_{CO} — маса оксиду вуглецю, кг;

B — маса палива, що згоріла, кг;

q — питомий коефіцієнт утворення оксиду вуглецю, кг/кг палива. (2.3)

При горінні 500 кг дизельного палива та питомому коефіцієнті 0,12 кг/кг:

$$M_{CO}=500 \cdot 0.12=60 \text{ кг}$$

З цього можна винести, що навіть локальна пожежа паливно-мастильних матеріалів супроводжується значними викидами токсичних газів у атмосферу.

Особливу небезпеку для атмосферного повітря становить утворення дрібнодисперсного пилу внаслідок руйнування будівель та інфраструктури [32, 33, 35, 36]. Під час вибухів та обвалення конструкцій у повітря потрапляють частинки цементу, бетону, скла, металів та інших будівельних матеріалів. Для орієнтовної оцінки кількості пилу використовується залежність:

$$M_{dust} = V \cdot \rho \cdot k_d$$

де

M_{dust} — маса пилу, кг;

V — об'єм зруйнованих конструкцій, м³;

ρ — середня густина будівельних матеріалів, кг/м³;

k_d — коефіцієнт пиловиділення. (2.4)

При руйнуванні 20 м³ бетонних конструкцій із середньою густиною 2400 кг/м³ та коефіцієнтом пиловиділення 0,015:

$$M_{dust}=20 \cdot 2400 \cdot 0.015=720 \text{ кг}$$

Отриманий результат свідчить про значне утворення пилових аерозолів, які можуть тривалий час перебувати у повітрі та негативно впливати на здоров'я населення.

Суттєвий внесок у забруднення атмосферного повітря здійснює військова техніка. Робота дизельних двигунів супроводжується викидами оксидів азоту, оксиду вуглецю, сажі та вуглеводнів. Орієнтовна маса викидів оксидів азоту від дизельного двигуна визначається за формулою:

$$M = G \cdot EF$$

де

M — маса забруднювальної речовини, кг;

G — витрати палива, кг;

EF — коефіцієнт емісії, кг/кг палива. (2.5)

При витратах дизельного палива 300 кг та коефіцієнті емісії оксидів азоту 0,04 кг/кг:

$$M = 300 \cdot 0.04 = 12 \text{ кг}$$

У разі інтенсивного використання великої кількості військової техніки сумарні викиди можуть досягати значних масштабів.

Для оцінки концентрації забруднювальної речовини у приземному шарі атмосфери часто застосовується спрощена модель розсіювання домішок:

$$C = \frac{M}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u)}$$

де

C — концентрація забруднювальної речовини, мг/м³;

M — інтенсивність викиду, мг/с;

σ_y — коефіцієнт атмосферного розсіювання по горизонталі;

σ_z — коефіцієнт атмосферного розсіювання по вертикалі

u — швидкість вітру, м/с. (2.6)

За умов інтенсивних викидів та низької швидкості вітру концентрації забруднювальних речовин у повітрі можуть значно перевищувати допустимі нормативи, що створює небезпеку для населення та природних екосистем.

Унаслідок пожеж та вибухів до атмосферного повітря також надходять важкі метали, зокрема свинець, кадмій, ртуть та мідь. Їх джерелами є уламки боєприпасів, залишки військової техніки, металеві конструкції та продукти горіння промислових матеріалів. Особливу небезпеку становить здатність важких металів накопичуватися у ґрунтах, водних об'єктах та живих організмах.

Важливим фактором забруднення є вторинне пилове навантаження, яке виникає через пересування військової техніки пошкодженими дорогами та відкритими ґрунтовими поверхнями. У суху та вітряну погоду пилові частинки можуть переноситися на значні відстані, формуючи стійкі зони забруднення атмосферного повітря.

Таким чином, основними джерелами забруднення атмосферного повітря в умовах бойових дій є вибухи боєприпасів, пожежі паливно-мастильних матеріалів, руйнування будівель та робота військової техніки. Проведені орієнтовні розрахунки свідчать про значні обсяги викидів оксидів азоту, оксиду вуглецю та пилових частинок, які формують складну багатокомпонентну систему атмосферного забруднення. Умови бойових дій створюють високий рівень екологічної небезпеки та потребують організації постійного моніторингу атмосферного повітря для оцінки масштабів забруднення та розробки ефективних природоохоронних заходів.

2.3. Аналіз показників забруднення атмосферного повітря

Аналіз показників забруднення атмосферного повітря в місті Херсон в умовах бойових дій доцільно здійснювати з урахуванням основних джерел воєнно-техногенного впливу: вибухів боєприпасів, пожеж паливно-мастильних матеріалів, руйнування будівельних конструкцій, роботи військової техніки та

повторного підняття пилу з пошкоджених дорожніх покриттів і відкритих ґрунтових поверхонь. На відміну від звичайних промислових викидів, такі джерела мають переважно неорганізований, короткочасний, але інтенсивний характер. Через це рівень забруднення атмосферного повітря може різко зростати після обстрілів, пожеж або руйнування інфраструктури, а потім поступово знижуватися залежно від метеорологічних умов.



Рис. 2.1 Карта районів бойових дій і потенційного забруднення повітря м. Херсон

Основними показниками, які характеризують стан атмосферного повітря в умовах бойових дій, є концентрації пилу PM_{10} і $PM_{2.5}$, оксидів азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки, сажі, летких органічних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів та важких металів. Найбільш небезпечними для населення є дрібнодисперсні частинки $PM_{2.5}$, оскільки вони здатні проникати глибоко у легені та потрапляти до кровоносної системи. В умовах Херсона їх утворення може бути пов'язане з вибухами, пожежами, руйнуванням бетонних і цегляних конструкцій, горінням пластику, гуми, палива та пересуванням важкої техніки [21, 22, 23, 24].

Для орієнтовної кількісної оцінки забруднення використаємо попередньо визначені розрахункові показники. За умов вибуху одного артилерійського боєприпасу з масою вибухової речовини 8 кг і питомим коефіцієнтом утворення оксидів азоту 0,18 кг/кг маса викидів оксидів азоту становить:

$$M_{\text{NO}_x} = 8 \cdot 0,18 = 1,44 \text{ кг}$$

Якщо протягом умовного епізоду відбулося 20 вибухів подібного типу, сумарна маса оксидів азоту становитиме:

$$M_{\text{NO}_x} \text{ заг} = 1,44 \cdot 20 = 28,8 \text{ кг.}$$

Отже, навіть один короточасний епізод обстрілу може супроводжуватися надходженням до атмосфери майже 29 кг оксидів азоту. Ці речовини мають високу токсичність, подразнюють органи дихання та беруть участь у формуванні фотохімічного смогу. За умов високих температур, характерних для півдня України, оксиди азоту можуть вступати у фотохімічні реакції з леткими органічними сполуками, утворюючи вторинні забруднювачі, зокрема приземний озон.

Пожежі паливно-мастильних матеріалів є іншим важливим джерелом забруднення атмосферного повітря. За попереднім розрахунком, при горінні 500 кг дизельного палива і питомому коефіцієнті утворення оксиду вуглецю 0,12 кг/кг маса викиду CO становить:

$$M_{\text{CO}} = 500 \cdot 0,12 = 60 \text{ кг.}$$

Якщо припустити, що внаслідок обстрілу або пожежі згоріло 1,5 т дизельного палива, то маса оксиду вуглецю дорівнюватиме:

$$M_{\text{CO}} = 1500 \cdot 0,12 = 180 \text{ кг.}$$

Цей показник свідчить про значне локальне забруднення повітря продуктами неповного згоряння. Оксид вуглецю є особливо небезпечним у районах щільної забудови, у підвальних приміщеннях, укриттях, пошкоджених будівлях або зонах зі слабким повітрообміном, оскільки він не має кольору та запаху, але здатний порушувати транспортування кисню в організмі людини.

Додатково можна оцінити утворення діоксиду сірки під час горіння дизельного палива. Якщо вміст сірки у паливі умовно прийняти на рівні 0,1 %, то в 1500 кг палива маса сірки становитиме:

$$M_S = 1500 \cdot 0,001 = 1,5 \text{ кг.}$$

Під час повного окиснення сірки до діоксиду сірки маса SO_2 визначається з урахуванням співвідношення молярних мас SO_2 і S:

$$M_{SO_2} = 1,5 \cdot 64 / 32 = 3 \text{ кг.}$$

Отже, при згорянні 1,5 т дизельного палива може утворитися близько 3 кг діоксиду сірки. Хоча цей показник менший порівняно з масою оксиду вуглецю, діоксид сірки має значний подразнювальний ефект і бере участь у формуванні кислотних опадів.

Особливо високі показники забруднення формуються під час руйнування будівель та інфраструктури. За попереднім розрахунком, при руйнуванні 20 м³ бетонних конструкцій із середньою густиною 2400 кг/м³ і коефіцієнтом пиловиділення 0,015 утворюється:

$$M_{\text{dust}} = 20 \cdot 2400 \cdot 0,015 = 720 \text{ кг пилу.}$$

Якщо умовно прийняти, що 30 % цього пилу становить фракція PM₁₀, а 10 % — фракція PM_{2.5}, то отримаємо:

$$MPM_{10} = 720 \cdot 0,30 = 216 \text{ кг;}$$

$$MPM_{2.5} = 720 \cdot 0,10 = 72 \text{ кг.}$$

Ці значення є екологічно значущими, оскільки дрібнодисперсний пил може тривалий час залишатися у повітрі, переноситися вітром і накопичуватися у приземному шарі атмосфери. Для міського середовища Херсона, де є пошкоджені будівлі, відкриті будівельні уламки та зруйновані дороги, пилове навантаження може бути одним із головних чинників погіршення якості повітря.

Додатково розрахуємо орієнтовну концентрацію пилу в локальній зоні забруднення. Якщо після руйнування конструкцій у повітря перейшло 72 кг PM_{2.5}, а хмара пилу поширилася в умовному об'ємі 2 000 000 м³, то концентрація становитиме:

$$C = 72\,000\,000 \text{ мг} / 2\,000\,000 \text{ м}^3 = 36 \text{ мг/м}^3.$$

Отримане значення є дуже високим і свідчить про небезпечний короточасний рівень запиленості в зоні руйнування. Навіть за подальшого розсіювання концентрація дрібнодисперсного пилу може залишатися небезпечною для населення, особливо для дітей, людей похилого віку та осіб із хронічними хворобами органів дихання.

Робота військової техніки також суттєво впливає на показники забруднення повітря. Якщо витрати дизельного палива становлять 300 кг, а коефіцієнт емісії оксидів азоту дорівнює 0,04 кг/кг, то маса викидів NO_x становить:

$$M_{\text{NO}_x} = 300 \cdot 0,04 = 12 \text{ кг}.$$

Для умовної групи з 10 одиниць техніки за однакових витрат палива сумарні викиди становитимуть:

$$M_{\text{NO}_x} \text{ заг} = 12 \cdot 10 = 120 \text{ кг}.$$

Крім оксидів азоту, дизельні двигуни утворюють сажу, оксид вуглецю, вуглеводні та дрібнодисперсні частинки. Якщо прийняти питомий коефіцієнт утворення сажі на рівні 0,003 кг/кг палива, то для 3000 кг дизельного палива, витраченого групою техніки, маса сажі становитиме:

$$M_{\text{сажі}} = 3000 \cdot 0,003 = 9 \text{ кг}.$$

Сажа є небезпечною складовою атмосферного забруднення, оскільки має високу адсорбційну здатність і може переносити на своїй поверхні токсичні органічні речовини, зокрема поліциклічні ароматичні вуглеводні.

Для узагальненої оцінки сумарного забруднення атмосферного повітря під час умовного воєнно-техногенного епізоду можна об'єднати основні розраховані показники та данні отримані на основі досліджень.



Рис. 2.2 Концептуальна модель системи моніторингу якості атмосферного повітря

Якщо врахувати 20 вибухів боєприпасів, горіння 1,5 т дизельного палива, руйнування 20 м³ бетонних конструкцій та роботу 10 одиниць військової техніки, то орієнтовна маса основних забруднювачів становитиме: оксиди азоту від вибухів — 28,8 кг, оксиди азоту від техніки — 120 кг, оксид вуглецю від горіння палива — 180 кг, діоксид сірки — 3 кг, загальний пил — 720 кг, PM_{10} — 216 кг, $\text{PM}_{2.5}$ — 72 кг, сажа — 9 кг.

Сумарна маса лише врахованих забруднювальних речовин дорівнює:

$$M_{\text{заг}} = 28,8 + 120 + 180 + 3 + 720 + 9 = 1060,8 \text{ кг.}$$

Якщо окремо враховувати фракції PM_{10} і $\text{PM}_{2.5}$ як частини загальної маси пилу, їх не слід додавати до загальної суми повторно, оскільки вони вже входять до 720 кг пилу. Отже, умовний епізод бойового впливу може сформувати понад 1 т забруднювальних речовин, не враховуючи леткі органічні сполуки, бенз(а)пірен, діоксини, важкі метали та інші токсиканти, які також утворюються під час пожеж і вибухів.

Для оцінки рівня небезпеки можна застосувати коефіцієнт перевищення відносно гранично допустимої концентрації:

$$K = C / \text{ГДК}. \quad (2.7)$$

Якщо умовна концентрація PM_{2.5} після розсіювання становить 0,15 мг/м³, а орієнтовне допустиме значення приймається на рівні 0,025 мг/м³, то:

$$K_{\text{PM}_{2.5}} = 0,15 / 0,025 = 6.$$

Це означає, що концентрація PM_{2.5} може перевищувати умовний безпечний рівень у 6 разів. Така ситуація є небезпечною для населення і потребує обмеження перебування на відкритому повітрі, проведення моніторингових вимірювань та заходів зі зменшення пилового навантаження.

Для оксидів азоту, якщо розрахункова концентрація в зоні впливу становить 0,4 мг/м³, а допустиме значення прийняти на рівні 0,2 мг/м³, коефіцієнт перевищення становитиме:

$$K_{\text{NO}_2} = 0,4 / 0,2 = 2.$$

Отже, в зоні активного впливу вибухів і роботи техніки можливе двократне перевищення допустимого рівня оксидів азоту. Це свідчить про підвищений ризик подразнення дихальних шляхів, загострення хронічних бронхолегеневих захворювань та формування вторинних фотохімічних забруднювачів.

Проведені розрахунки мають орієнтовний характер, однак вони дозволяють показати загальну тенденцію: найбільший внесок у масу забруднення атмосферного повітря в умовах бойових дій формують пилові частинки від руйнування будівель, оксид вуглецю від горіння палива та оксиди азоту від вибухів і роботи дизельної техніки. Найбільш небезпечними з погляду впливу на здоров'я є PM_{2.5}, NO₂, CO, сажа, поліциклічні ароматичні вуглеводні та важкі метали.

Аналіз показників забруднення атмосферного повітря в Херсоні в умовах бойових дій свідчить про формування складної багатокомпонентної системи забруднення. Основними показниками екологічної небезпеки є зростання концентрацій дрібнодисперсного пилу, оксидів азоту, оксиду вуглецю, діоксиду

сірки та продуктів неповного згоряння. Додаткові розрахунки підтверджують, що навіть один умовний епізод бойового впливу може супроводжуватися утворенням понад 1 т забруднювальних речовин. Це обґрунтовує необхідність постійного моніторингу атмосферного повітря, оцінки фактичних концентрацій забруднювачів, фіксації екологічної шкоди та розробки заходів щодо зниження ризиків для населення і довкілля.

2.4. Оцінка екологічних ризиків для населення та довкілля

Оцінка екологічних ризиків для населення та довкілля в умовах бойових дій у місті Херсон має базуватися на аналізі основних забруднювальних речовин, джерел їх утворення, можливих шляхів поширення та ступеня небезпеки для людини й природних компонентів. В умовах воєнного впливу атмосферне повітря забруднюється не лише традиційними викидами транспорту чи промисловості, а й продуктами вибухів, пожеж, руйнування будівель, горіння пального, пластику, гуми, деревини, будівельних матеріалів та роботи військової техніки. Саме тому екологічний ризик має комплексний характер і охоплює ризики для здоров'я населення, ґрунтів, водних об'єктів, рослинності та тваринного світу.

Для умовної оцінки ризику можна використати коефіцієнт небезпеки:

$$Q = \frac{C}{ГДК}$$

де

Q — коефіцієнт небезпеки;

C — фактична або розрахункова концентрація забруднювальної речовини, мг/м³;

ГДК — гранично допустима концентрація речовини, мг/м³. (2.8)

Якщо Q менше 1, ризик вважається допустимим. Якщо Q дорівнює або перевищує 1, це свідчить про перевищення нормативного рівня та наявність потенційної небезпеки для здоров'я населення і довкілля.

Для оцінки ризику приймемо умовні розрахункові концентрації забруднювальних речовин після воєнно-техногенного епізоду: $PM_{2.5}$ — 0,15 мг/м³, NO_2 — 0,4 мг/м³, CO — 8 мг/м³, SO_2 — 0,12 мг/м³. Для порівняння використаємо орієнтовні допустимі значення: $PM_{2.5}$ — 0,025 мг/м³, NO_2 — 0,2 мг/м³, CO — 5 мг/м³, SO_2 — 0,05 мг/м³.

Розрахунок для дрібнодисперсного пилу $PM_{2.5}$:

$$Q_{PM_{2.5}} = 0,15 / 0,025 = 6. \quad (3.9)$$

Це означає, що концентрація $PM_{2.5}$ перевищує допустимий рівень у 6 разів. Такий показник є високонебезпечним, оскільки дрібнодисперсний пил може проникати глибоко в легені, потрапляти у кровоносну систему та спричиняти захворювання органів дихання і серцево-судинної системи.

Розрахунок для діоксиду азоту:

$$Q_{NO_2} = 0,4 / 0,2 = 2.$$

Отже, концентрація діоксиду азоту перевищує допустиме значення у 2 рази. Це свідчить про підвищений ризик подразнення дихальних шляхів, загострення бронхіту, астми та формування фотохімічного смогу в літній період.

Розрахунок для оксиду вуглецю:

$$Q_{CO} = 8 / 5 = 1,6.$$

Отримане значення показує перевищення допустимого рівня у 1,6 раза. Оксид вуглецю є небезпечним через здатність порушувати транспортування кисню в організмі людини, що особливо небезпечно для дітей, людей похилого віку та осіб із серцево-судинними захворюваннями.

Розрахунок для діоксиду сірки:

$$Q_{SO_2} = 0,12 / 0,05 = 2,4.$$

Цей показник свідчить про перевищення допустимого рівня у 2,4 раза. Діоксид сірки подразнює слизові оболонки, негативно впливає на органи дихання та бере участь у формуванні кислотних опадів.

Для комплексної оцінки екологічного ризику можна визначити сумарний індекс небезпеки:

$$HI = Q_{PM2.5} + Q_{NO_2} + Q_{CO} + Q_{SO_2}. \quad (3.10)$$

$$HI = 6 + 2 + 1,6 + 2,4 = 12.$$

Отримане значення $HI = 12$ свідчить про високий рівень комплексного ризику для населення. Найбільший внесок у загальний ризик має дрібнодисперсний пил $PM_{2.5}$, оскільки його коефіцієнт небезпеки є найвищим.

Умовна діаграма внеску забруднювачів у загальний ризик має такий вигляд:



Рис. 2.3 Діаграма внеску забруднювачів після початку бойових дій

З наведеної діаграми видно, що найбільш небезпечним забруднювачем є $PM_{2.5}$. Його частка у сумарному індексі ризику становить:

$$\text{Частка } PM_{2.5} = 6 / 12 \cdot 100 = 50 \, \%.$$

$$\text{Частка } NO_2:$$

$$\text{Частка } NO_2 = 2 / 12 \cdot 100 = 16,7 \, \%.$$

Частка CO:

$$\text{Частка CO} = 1,6 / 12 \cdot 100 = 13,3 \%$$

Частка SO₂:

$$\text{Частка SO}_2 = 2,4 / 12 \cdot 100 = 20 \%$$

Отже, половину сумарного ризику формує саме дрібнодисперсний пил, який виникає внаслідок руйнування будівель, вибухів, пожеж і повторного підняття пилу з пошкоджених поверхонь.

Для населення найбільші ризики пов'язані з ураженням органів дихання, серцево-судинної системи, подразненням слизових оболонок, зниженням імунітету та підвищенням імовірності хронічних захворювань. Особливо вразливими групами є діти, люди похилого віку, вагітні жінки, особи з астмою, хронічним бронхітом, серцевими захворюваннями та мешканці районів, розташованих поблизу місць обстрілів, пожеж або руйнувань.

Для довкілля ризики проявляються через осідання пилу, сажі, важких металів і токсичних органічних сполук на ґрунти, рослинність та водні об'єкти. Забруднювачі можуть накопичуватися у верхніх шарах ґрунту, погіршувати його фізико-хімічні властивості, пригнічувати розвиток рослин і потрапляти до харчових ланцюгів. Оксиди азоту та діоксид сірки сприяють формуванню кислотних опадів, що негативно впливає на ґрунти, зелені насадження та водні екосистеми.

Умовна схема поширення екологічного ризику може бути подана так:

Бойові дії → вибухи, пожежі, руйнування → викиди пилу, газів і токсикантів → забруднення атмосферного повітря → вплив на населення → осідання на ґрунти, воду, рослинність → довгострокова деградація довкілля.

Дана оцінка екологічних ризиків для населення та довкілля свідчить про високий рівень небезпеки атмосферного забруднення в Херсоні в умовах бойових дій. Розрахований сумарний індекс небезпеки НІ = 12 вказує на значне перевищення умовно допустимого рівня ризику. Найбільшу загрозу становлять дрібнодисперсний пил PM_{2.5}, діоксид сірки, діоксид азоту та оксид вуглецю. Це обґрунтовує необхідність постійного моніторингу якості атмосферного

повітря, обмеження перебування населення в зонах підвищеного забруднення, очищення територій від уламків і пилових матеріалів, а також подальшої оцінки забруднення ґрунтів, водних об'єктів і зелених насаджень.

2.5. Порівняльний аналіз стану атмосферного повітря до та після початку бойових дій

Порівняльний аналіз стану атмосферного повітря в місті Херсон до та після початку бойових дій дає змогу визначити, як змінилася структура джерел забруднення, характер надходження шкідливих речовин в атмосферу та рівень екологічного ризику для населення і довкілля. До початку активних бойових дій якість атмосферного повітря в місті формувалася переважно під впливом традиційних антропогенних джерел: автомобільного транспорту, промислових підприємств, портової інфраструктури, комунально-енергетичного сектору та побутового опалення. Після початку бойових дій до цих факторів додалися нові, значно небезпечніші джерела забруднення: вибухи боєприпасів, пожежі, руйнування будівель, горіння паливно-мастильних матеріалів, пошкодження промислових об'єктів, використання військової техніки та повторне підняття пилу з уламків і зруйнованих доріг.

У довоєнний період забруднення атмосферного повітря мало відносно стабільний і прогнозований характер. Основними речовинами були оксид вуглецю, діоксид азоту, діоксид сірки, пил, формальдегід та продукти згоряння палива. Їх концентрації змінювалися залежно від інтенсивності транспорту, метеорологічних умов, сезону року та роботи промислових підприємств. У цей період основне навантаження припадало на транспортні магістралі, промислові зони, портову територію та райони щільної міської забудови [13, 14, 18].



Рис. 2.4 Порівняння середніх концентрацій забруднюючих речовин
(до/після, між містами, між сезонами)



Рис. 2.5 Порівняння середніх концентрацій забруднюючих речовин 2
(до/після, між містами, між сезонами)

Після початку бойових дій характер забруднення різко змінився. Якщо раніше викиди були переважно регулярними та пов'язаними з господарською діяльністю, то в умовах війни вони стали епізодичними, але значно інтенсивнішими. Після обстрілів або пожеж у повітря одночасно потрапляють великі маси пилу, сажі, оксидів азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки, важких металів та органічних токсикантів. Це створює короточасні, але дуже небезпечні пікові концентрації забруднювальних речовин.

Для порівняльної оцінки можна використати умовні середні концентрації основних забруднювачів до та після початку бойових дій. До бойових дій приймемо такі умовні значення: $PM_{2.5}$ — $0,025 \text{ мг/м}^3$, NO_2 — $0,12 \text{ мг/м}^3$, CO — $3,0 \text{ мг/м}^3$, SO_2 — $0,03 \text{ мг/м}^3$. Після початку бойових дій, з урахуванням попередніх розрахунків і воєнно-техногенних джерел, приймемо: $PM_{2.5}$ — $0,15 \text{ мг/м}^3$, NO_2 — $0,40 \text{ мг/м}^3$, CO — $8,0 \text{ мг/м}^3$, SO_2 — $0,12 \text{ мг/м}^3$.

Порівняння для $PM_{2.5}$:

$$K_{\text{зростання}} = 0,15 / 0,025 = 6.$$

Отже, умовна концентрація дрібнодисперсного пилу $PM_{2.5}$ після початку бойових дій зросла у 6 разів. Це є найбільш небезпечним показником, оскільки $PM_{2.5}$ утворюється під час вибухів, пожеж, руйнування будівельних конструкцій і повторного підняття пилу. Його зростання свідчить про суттєве посилення ризику для органів дихання та серцево-судинної системи населення.

Порівняння для діоксиду азоту:

$$K_{\text{зростання}} = 0,40 / 0,12 = 3,33.$$

Це означає, що концентрація NO_2 після початку бойових дій збільшилася приблизно у 3,3 раза. Основними причинами такого зростання є вибухи боєприпасів, робота військової техніки, дизельних генераторів і горіння палива. Діоксид азоту має подразнювальну дію на дихальні шляхи та бере участь у формуванні фотохімічного смогу.

Порівняння для оксиду вуглецю:

$$K_{\text{зростання}} = 8,0 / 3,0 = 2,67.$$

Отже, концентрація СО збільшилася приблизно у 2,7 рази. Зростання цього показника пов'язане з неповним згорянням палива, пожежами, роботою двигунів внутрішнього згоряння та горінням матеріалів у пошкоджених будівлях. Оксид вуглецю є небезпечним через здатність блокувати перенесення кисню в організмі людини.

Порівняння для діоксиду сірки:

$$K_{\text{зростання}} = 0,12 / 0,03 = 4.$$

Це свідчить про чотириразове зростання концентрації SO₂. Джерелами такого забруднення є горіння дизельного палива, нафтопродуктів, промислових матеріалів та пожежі на об'єктах інфраструктури. Діоксид сірки негативно впливає на органи дихання та сприяє формуванню кислотних опадів.

Для узагальнення можна розрахувати індекс забруднення атмосфери за спрощеною формулою:

$$I = \frac{c}{\text{ГДК}} \quad (3.11)$$

Для кожної речовини приймемо орієнтовні допустимі значення: PM_{2.5} — 0,025 мг/м³, NO₂ — 0,2 мг/м³, CO — 5 мг/м³, SO₂ — 0,05 мг/м³.

Довоєнний рівень індексу для PM_{2.5}:

$$I_{\text{PM}_{2.5}} = 0,025 / 0,025 = 1.$$

Для NO₂:

$$I_{\text{NO}_2} = 0,12 / 0,2 = 0,6.$$

Для CO:

$$I_{\text{CO}} = 3,0 / 5 = 0,6.$$

Для SO₂:

$$I_{\text{SO}_2} = 0,03 / 0,05 = 0,6.$$

Сумарний умовний індекс забруднення до початку бойових дій:

$$I_{\text{до}} = 1 + 0,6 + 0,6 + 0,6 = 2,8.$$

Після початку бойових дій:

$$I_{PM2.5} = 0,15 / 0,025 = 6.$$

$$I_{NO_2} = 0,40 / 0,2 = 2.$$

$$I_{CO} = 8,0 / 5 = 1,6.$$

$$I_{SO_2} = 0,12 / 0,05 = 2,4.$$

Сумарний умовний індекс забруднення після початку бойових дій:

$$I_{\text{після}} = 6 + 2 + 1,6 + 2,4 = 12.$$

Порівняємо сумарні індекси:

$$K_{\text{заг}} = 12 / 2,8 = 4,29.$$

Отже, загальний рівень атмосферного забруднення після початку бойових дій умовно зріс приблизно у 4,3 раза. Це свідчить про перехід екологічної ситуації від відносно контрольованого антропогенного забруднення до високонебезпечного воєнно-техногенного забруднення.

Для більш наочного порівняння можна подати умовну діаграму зміни коефіцієнтів небезпеки:

До бойових дій:



Рис. 2.6 Діаграма внеску забруднювачів до початку бойових дій

Після початку бойових дій:



Рис. 2.7 Діаграма внеску забруднювачів після початку бойових дій

З наведеної порівняльної оцінки видно, що найбільше зростання спостерігається для PM_{2.5} та SO₂. Дрібнодисперсний пил став головним показником екологічної небезпеки, оскільки його концентрація збільшується внаслідок руйнування будівель, вибухів, пожеж і вторинного пилового навантаження. Діоксид сірки, хоча й має меншу абсолютну концентрацію, характеризується високою токсичністю та здатністю формувати кислотні опади.

Окремо доцільно оцінити зміну маси забруднювальних речовин під час умовного епізоду. У довоєнних умовах основними джерелами могли бути транспортні викиди. Наприклад, якщо 100 автомобілів за певний період спалювали 500 кг палива, а питомий коефіцієнт утворення CO становив 0,08 кг/кг палива, маса викидів оксиду вуглецю дорівнювала:

$$M_{CO \text{ до}} = 500 \cdot 0,08 = 40 \text{ кг.}$$

В умовах бойових дій, якщо внаслідок пожежі згоріло 1500 кг дизельного палива з коефіцієнтом утворення CO 0,12 кг/кг, маса CO становить:

$$M_{CO \text{ після}} = 1500 \cdot 0,12 = 180 \text{ кг.}$$

Коефіцієнт зростання маси CO:

$$K = 180 / 40 = 4,5.$$

Отже, лише за одним епізодом пожежі маса викидів оксиду вуглецю може бути у 4,5 разів більшою, ніж від умовного транспортного навантаження за аналогічний період.

Аналогічно можна порівняти пилове навантаження. У довоєнних умовах пилове забруднення формувалося переважно транспортом, дорожнім пилом і промисловою діяльністю. Якщо умовна маса пилу за певний період становила 100 кг, то після руйнування 20 м³ бетонних конструкцій утворюється:

$$M_{\text{dust після}} = 20 \cdot 2400 \cdot 0,015 = 720 \text{ кг.}$$

Коефіцієнт зростання пилового навантаження:

$$K = 720 / 100 = 7,2.$$

Це означає, що пилове навантаження внаслідок одного епізоду руйнування може перевищувати довоєнний умовний рівень у 7,2 рази. Саме тому руйнування будівель є одним із ключових факторів погіршення якості атмосферного повітря.

Важливо зазначити, що до початку бойових дій забруднення атмосферного повітря переважно підлягало регулюванню через систему дозволів на викиди, промисловий контроль, санітарні норми та державний моніторинг. Після початку бойових дій значна частина джерел забруднення стала неконтрольованою. Вибухи, пожежі та руйнування виникають раптово, часто в житлових районах, поблизу об'єктів соціальної інфраструктури, шкіл, лікарень та місць перебування населення. Це суттєво підвищує небезпеку впливу забруднювачів.

Змінився також просторовий характер забруднення. У довоєнний період найбільше навантаження припадало на дороги, промислові майданчики та портову зону. В умовах бойових дій джерела забруднення можуть виникати практично в будь-якій частині міста. Це призводить до нерівномірного, осередкового забруднення, коли окремі райони можуть зазнавати короткочасного, але дуже сильного впливу [2, 3, 32, 33, 36, 37].

За характером впливу на здоров'я населення після початку бойових дій зросла роль гострих і хронічних ризиків. Гострий ризик формується одразу після вибухів і пожеж, коли концентрації пилу, диму та токсичних газів різко зростають. Хронічний ризик пов'язаний із тривалим перебуванням населення в середовищі, де наявні залишкові забруднення, пил від руйнувань, сажа, важкі метали та продукти горіння.

Для довкілля після початку бойових дій зросли ризики вторинного забруднення ґрунтів, водних об'єктів і рослинності. Якщо до війни атмосферні викиди здебільшого розсіювалися та контролювалися в межах промислових нормативів, то в умовах бойових дій значна частина токсичних речовин осідає на поверхню ґрунтів, дахів, рослин, водойм і зруйнованої інфраструктури. Це створює довгострокову екологічну загрозу, оскільки важкі метали, сажа та органічні токсиканти можуть зберігатися в середовищі протягом тривалого часу.

Таким чином, порівняльний аналіз стану атмосферного повітря до та після початку бойових дій свідчить про різке погіршення екологічної ситуації в місті Херсон. Умовний сумарний індекс забруднення зріс із 2,8 до 12, тобто приблизно у 4,3 рази. Найбільше зростання характерне для PM_{2.5}, SO₂, NO₂ та CO. Основна причина такого погіршення полягає у зміні структури джерел забруднення: замість переважно контрольованих транспортних і промислових викидів домінуючими стали неконтрольовані воєнно-техногенні джерела — вибухи, пожежі, руйнування будівель і робота військової техніки. Це створює високі ризики для здоров'я населення, погіршує стан довкілля та потребує постійного моніторингу, фіксації екологічної шкоди й подальшого відновлення міського середовища.

Для більш наочного відображення змін екологічних показників, визначення основних джерел забруднення та оцінки їх внеску у формування екологічних ризиків доцільно систематизувати розрахункові дані у вигляді узагальнювальної таблиці.

У таблиці 2.1 наведено основні результати оцінки впливу бойових дій на стан атмосферного повітря, включаючи зміни концентрацій пріоритетних забруднювальних речовин, показники індексу забруднення атмосфери, характеристики пилового навантаження, ефективність запропонованих природоохоронних заходів та результати удосконалення системи екологічного моніторингу.

Таблиця 2.1

Узагальнення результатів оцінки впливу бойових дій на стан атмосферного повітря

Показник	До бойових дій	Після початку бойових дій	Зміна
1	2	3	4
Концентрація PM2.5, мг/м ³	0,025	0,150	↑ у 6,0 разів
Концентрація NO ₂ , мг/м ³	0,12	0,40	↑ у 3,33 рази
Концентрація CO, мг/м ³	3,0	8,0	↑ у 2,67 рази
Концентрація SO ₂ , мг/м ³	0,03	0,12	↑ у 4,0 рази
Сумарний індекс забруднення атмосфери	2,8	12,0	↑ у 4,29 рази
Частка PM2.5 у сумарному ризику	35,7 %	50,0 %	+14,3 %
Частка NO ₂ у сумарному ризику	21,4 %	16,7 %	–4,7 %
Частка CO у сумарному ризику	21,4 %	13,3 %	–8,1 %
Частка SO ₂ у сумарному ризику	21,4 %	20,0 %	–1,4 %
Маса CO від умовного транспортного навантаження, кг	40	—	—
Маса CO під час пожежі, кг	—	180	↑ у 4,5 рази

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
Утворення пилу від руйнування конструкцій, кг	100	720	↑ у 7,2 рази
Маса фракції РМ10, кг	—	216	Формування вторинного пилового забруднення
Маса фракції РМ2.5, кг	—	72	Формування дрібнодисперсного пилу
Прогнозована концентрація РМ2.5 після впровадження природоохоронних заходів, мг/м ³	0,085	0,055	Зниження на 35 %
Ефективність екологічного відновлення території	—	40 %	Позитивний ефект
Коефіцієнт підвищення оперативності системи моніторингу	—	6	Реагування прискорюється у 6 разів

Проведені розрахунки свідчать про суттєве погіршення стану атмосферного повітря внаслідок бойових дій. Найбільший внесок у формування екологічного ризику роблять дрібнодисперсні частинки РМ2.5, концентрація яких збільшилася у шість разів порівняно з довоєнним періодом. Запропоновані природоохоронні заходи дозволяють знизити рівень забруднення приблизно на 35–40 %, що підтверджує доцільність їх впровадження під час післявоєнного відновлення територій.

РОЗДІЛ III. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

3.1. Розробка заходів щодо покращення якості атмосферного повітря

Заходи щодо зменшення рівня забруднення атмосферного повітря

В умовах збройної агресії та масштабного руйнування промислової, енергетичної й транспортної інфраструктури України проблема забруднення атмосферного повітря набуває особливої актуальності. Основними джерелами надходження забруднювальних речовин у повітря під час бойових дій є пожежі на нафтобазах і складах паливно-мастильних матеріалів, руйнування промислових підприємств, вибухи боєприпасів, робота військової техніки, горіння будівельних матеріалів, а також неконтрольоване накопичення відходів руйнувань. У результаті в атмосферне повітря надходять тверді частинки $PM_{2.5}$ та PM_{10} , оксиди азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки, бенз(а)пірен, важкі метали, діоксини та інші токсичні сполуки. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки та впровадження комплексу природоохоронних заходів, спрямованих на стабілізацію екологічної ситуації та покращення якості атмосферного повітря.

Одним із першочергових заходів є локалізація та ліквідація джерел вторинного пилового забруднення. Значні площі зруйнованих територій після бойових дій стають джерелом підвищеного утворення пилу внаслідок руйнування бетонних конструкцій, асфальтового покриття, будівельних матеріалів та ґрунтового покриву. Для зниження концентрацій пилу необхідно здійснювати систематичне зволоження територій, особливо у сухий та вітряний період року. Найбільш ефективним є використання спеціалізованої поливальної техніки, а також мобільних систем пилопригнічення. Додатково доцільним є застосування тимчасових захисних екранів та ізолювання місць накопичення будівельних відходів [14, 15, 24, 44].

Важливим напрямом зменшення забруднення атмосферного повітря є оперативне гасіння пожеж та попередження повторного займання об'єктів інфраструктури. Під час горіння нафтопродуктів, пластмас, лакофарбових матеріалів і полімерів в атмосферу потрапляють високотоксичні канцерогенні речовини, що становлять значну небезпеку для населення. З метою мінімізації викидів необхідно впроваджувати сучасні системи пожежогасіння, використовувати мобільні установки водяного та пінного типу, а також забезпечувати швидке реагування аварійно-рятувальних служб. Особливе значення має створення резервних систем протипожежного водопостачання для об'єктів критичної інфраструктури.

Для зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря необхідним є відновлення та модернізація промислових підприємств із впровадженням сучасних газоочисних технологій. Значна частина промислових об'єктів України використовує застарілі системи очищення викидів, ефективність яких не відповідає сучасним екологічним вимогам. У процесі післявоєнного відновлення доцільним є встановлення електрофільтрів, рукавних фільтрів, циклонів високої ефективності, скрубєрів та адсорбційних установок для очищення газових викидів. Для теплоенергетичних підприємств особливого значення набуває впровадження систем десульфуризації та денітрифікації димових газів, що дозволить значно скоротити викиди діоксиду сірки та оксидів азоту.

Одним із ключових заходів покращення якості атмосферного повітря є розвиток системи екологічного моніторингу. У сучасних умовах особливої актуальності набуває створення автоматизованої мережі спостережень за станом атмосферного повітря із використанням IoT-технологій та цифрових платформ збору даних. Встановлення автоматичних постів контролю дозволить у режимі реального часу визначати концентрації основних забруднювачів та оперативно реагувати на випадки перевищення гранично допустимих концентрацій. Доцільним є також застосування супутникового моніторингу та

геоінформаційних систем для оцінки поширення забруднюючих речовин у районах бойових дій.

Важливим напрямом покращення стану атмосферного повітря є збільшення площ зелених насаджень та створення природних бар'єрів. Рослинність виконує функцію природного фільтра, затримуючи пил та частково поглинаючи токсичні гази. У містах, які зазнали значних руйнувань, необхідно реалізовувати програми масштабного озеленення територій, створення захисних лісосмуг, рекультивації деградованих земель і відновлення паркових зон. Найбільш ефективними для очищення повітря є види рослин із високою пилозатримувальною здатністю, зокрема липа, клен, тополя, каштан та хвойні насадження.

Окрему увагу необхідно приділити скороченню викидів від транспорту. В умовах воєнного стану значно зросло використання дизельної техніки, генераторів та вантажного транспорту, що призводить до збільшення концентрацій оксидів азоту, чадного газу та дрібнодисперсного пилу. Для зменшення транспортного забруднення доцільним є оновлення автопарку, розвиток електротранспорту, використання альтернативних видів пального та оптимізація транспортних потоків у містах. Додатково необхідно забезпечити контроль технічного стану транспортних засобів і дотримання екологічних стандартів щодо викидів.

Суттєве значення для покращення якості атмосферного повітря має належне поводження з відходами руйнувань. Будівельні відходи, які накопичуються після обстрілів та руйнувань, часто містять азбест, важкі метали, залишки паливно-мастильних матеріалів та інші небезпечні речовини. У процесі їх накопичення та несанкціонованого спалювання відбувається додаткове забруднення повітря токсичними сполуками. У зв'язку з цим необхідним є створення систем сортування, переробки та безпечного захоронення відходів руйнувань із дотриманням екологічних вимог [3, 15, 32, 33, 44].

Для оцінки ефективності природоохоронних заходів може бути використаний умовний розрахунок зниження концентрації дрібнодисперсного пилу $PM_{2.5}$ після впровадження систем пилопригнічення та озеленення територій [21, 24, 25]. Якщо початкова концентрація $PM_{2.5}$ у районі становила $0,085 \text{ мг/м}^3$, а ефективність комплексу заходів оцінюється на рівні 35 %, прогнозоване значення концентрації після впровадження заходів визначається за формулою:

$$C_{\text{після}} = C_{\text{поч}} \cdot (1 - \eta)$$

де

$C_{\text{після}}$ — прогнозована концентрація після впровадження заходів, мг/м^3 ;

$C_{\text{поч}}$ — початкова концентрація забруднювача, мг/м^3 ;

η — ефективність природоохоронних заходів. (3.1)

Підставивши значення у формулу, отримуємо:

$$C_{\text{після}} = 0,085 \cdot (1 - 0,35) = 0,055 \text{ мг/м}^3$$

Таким чином, реалізація комплексу природоохоронних заходів дозволяє знизити концентрацію $PM_{2.5}$ приблизно на 35 %, що сприятиме зменшенню екологічного ризику для населення та покращенню санітарно-гігієнічного стану територій.

Отже, ефективне покращення якості атмосферного повітря в Україні в умовах та після завершення бойових дій можливе лише за умови комплексного підходу, який поєднуватиме технічні, організаційні, природоохоронні та управлінські заходи. Реалізація зазначених напрямів сприятиме поступовій стабілізації екологічної ситуації, зменшенню рівня захворюваності населення та формуванню безпечного середовища життєдіяльності.

3.2. Удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря

В умовах бойових дій ефективний моніторинг атмосферного повітря є одним із ключових інструментів забезпечення екологічної безпеки населення та своєчасного реагування на надзвичайні ситуації. Руйнування промислових об'єктів, пожежі на нафтобазах, застосування вибухових речовин та активне використання військової техніки призводять до значного збільшення обсягів викидів забруднюючих речовин у повітря. За таких умов традиційні системи екологічного контролю часто виявляються недостатньо ефективними через обмежену кількість стаціонарних постів спостереження, недостатню оперативність отримання даних та низький рівень автоматизації. У зв'язку з цим особливого значення набуває удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря на основі сучасних цифрових технологій, автоматизованих систем спостереження та геоінформаційних платформ [11, 12, 16, 18, 19].

Сучасна система моніторингу атмосферного повітря повинна функціонувати як інтегрована багаторівнева мережа збору, обробки та аналізу екологічної інформації. Основними компонентами такої системи є супутникові засоби дистанційного зондування Землі, наземні автоматизовані станції контролю, мобільні екологічні лабораторії, геоінформаційні системи та аналітичні цифрові платформи прогнозування стану атмосферного повітря.

Важливим напрямом удосконалення моніторингу є використання супутникових технологій. Супутникові системи дозволяють здійснювати оперативне виявлення пожеж, зон задимлення та поширення аерозольних частинок на великих територіях. Особливу цінність мають дані супутників Sentinel-5P, MODIS та VIIRS, які забезпечують визначення концентрацій діоксиду азоту, діоксиду сірки, чадного газу та аерозольного індексу атмосфери. Використання дистанційного зондування дає можливість оцінювати екологічний стан територій, де проведення наземних вимірювань є ускладненим або небезпечним через активні бойові дії [26, 27, 28, 39, 40, 41].

Основу системи екологічного контролю повинні становити автоматизовані наземні станції моніторингу атмосферного повітря. Такі станції забезпечують безперервне вимірювання концентрацій основних забруднювачів, зокрема $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO , O_3 та летких органічних сполук. Важливою перевагою автоматизованих постів є можливість передачі даних у режимі реального часу до центральних серверів обробки інформації. Це дозволяє оперативно фіксувати перевищення гранично допустимих концентрацій та своєчасно інформувати населення про небезпечні рівні забруднення.

Для контролю стану атмосферного повітря у районах надзвичайних ситуацій та безпосередньо поблизу зон бойових дій доцільним є використання мобільних екологічних лабораторій. Такі лабораторії забезпечують оперативний виїзд у райони пожеж, вибухів або руйнувань промислових об'єктів та дозволяють здійснювати експрес-аналіз проб повітря. Використання мобільних систем моніторингу особливо важливе у випадках аварійних викидів токсичних речовин, коли необхідно швидко визначити масштаби забруднення та оцінити ризики для населення.

Значну роль у вдосконаленні системи моніторингу відіграють геоінформаційні системи (GIS). GIS-технології забезпечують просторовий аналіз екологічних даних, картографування джерел забруднення та моделювання поширення забруднюючих речовин у атмосферному повітрі. За допомогою геоінформаційних платформ можна формувати інтерактивні карти екологічного стану територій, визначати зони підвищеного ризику та прогнозувати можливі сценарії розвитку екологічної ситуації. Особливого значення GIS-системи набувають під час аналізу впливу метеорологічних факторів, зокрема швидкості та напрямку вітру, температурних інверсій і вологості повітря, на поширення забруднювачів.

Для забезпечення ефективного функціонування системи моніторингу необхідним є створення єдиної інформаційної платформи збору та зберігання екологічних даних. Така платформа повинна забезпечувати інтеграцію інформації з різних джерел спостереження, автоматичну обробку результатів

вимірювань та формування аналітичних звітів. Використання хмарних технологій дозволяє забезпечити резервне зберігання інформації, захист даних та безперервний доступ до екологічної інформації для органів державного управління, наукових установ та громадськості.

Одним із перспективних напрямів розвитку систем моніторингу є застосування математичного моделювання та прогнозування стану атмосферного повітря. Сучасні програмні комплекси, зокрема AERMOD, CALPUFF, CMAQ та WRF-Chem, дозволяють прогнозувати поширення забруднюючих речовин залежно від інтенсивності викидів і метеорологічних умов. Використання прогнозних моделей дає можливість оцінювати потенційні екологічні ризики, прогнозувати формування зон високого забруднення та розробляти заходи щодо мінімізації негативного впливу на населення.

Концептуальна модель удосконаленої системи моніторингу атмосферного повітря представлена на рисунку 3.1.

Запропонована система передбачає інтеграцію супутникових спостережень, автоматизованих наземних постів, мобільних лабораторій та геоінформаційних систем у єдину цифрову платформу екологічного моніторингу. Такий підхід забезпечує комплексний контроль стану атмосферного повітря, оперативне виявлення джерел забруднення, прогнозування розвитку екологічної ситуації та підтримку прийняття управлінських рішень.

Для оцінки ефективності модернізованої системи моніторингу можна використати умовний показник оперативності реагування на випадки перевищення концентрацій забруднювачів. Якщо у традиційній системі середній час виявлення небезпечного забруднення становив 12 годин, а після автоматизації скоротився до 2 годин, коефіцієнт підвищення оперативності визначається за формулою:

$$K = \frac{t_1}{t_2}$$

де

K — коефіцієнт підвищення оперативності;

t_1 — час реагування традиційної системи, год;

t_2 — час реагування автоматизованої системи, год.

(3.2)

Підставивши значення у формулу, отримуємо:

$$K = \frac{12}{2} = 6$$



Рис. 3.1 Концептуальна модель удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря

Отже, модернізована автоматизована система моніторингу дозволяє підвищити оперативність реагування на екологічні загрози у шість разів, що є особливо важливим в умовах бойових дій та надзвичайних ситуацій.

Таким чином, удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря повинно базуватися на комплексному використанні сучасних інформаційних технологій, автоматизованих систем спостереження, супутникового моніторингу та математичного прогнозування. Реалізація таких заходів забезпечить підвищення ефективності екологічного контролю, своєчасне виявлення небезпечних забруднень та зменшення ризиків для населення і навколишнього природного середовища.

3.3. Рекомендації щодо екологічного відновлення територій, що постраждали внаслідок бойових дій

Бойові дії на території України спричинили значні негативні наслідки для навколишнього природного середовища, зокрема для атмосферного повітря, ґрунтів, водних ресурсів та природних екосистем. Руйнування промислових підприємств, енергетичних об'єктів, житлової інфраструктури, виникнення масштабних пожеж і накопичення великої кількості відходів призвели до формування осередків інтенсивного техногенного забруднення. У зв'язку з цим екологічне відновлення територій, що постраждали внаслідок бойових дій, є одним із пріоритетних напрямів державної екологічної політики та важливою складовою післявоєнного відновлення країни.

Екологічне відновлення повинно базуватися на комплексному підході, який передбачає поєднання організаційних, технічних, природоохоронних та соціально-економічних заходів. Основною метою таких заходів є мінімізація рівня екологічної небезпеки, відновлення природної стійкості територій та створення безпечних умов для проживання населення.

Одним із першочергових заходів є проведення комплексної екологічної оцінки постраждалих територій. Перед початком відновлювальних робіт необхідно здійснити інвентаризацію джерел забруднення, визначити масштаби пошкоджень та оцінити рівень забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних об'єктів. Особливу увагу необхідно приділяти територіям поблизу зруйнованих промислових підприємств, нафтобаз, складів паливно-мастильних матеріалів та місць тривалих пожеж. Для оцінки екологічного стану доцільно використовувати автоматизовані системи моніторингу, мобільні лабораторії та супутникові методи дистанційного зондування Землі.

Важливим напрямом екологічного відновлення є ліквідація наслідків руйнувань та очищення територій від небезпечних відходів. У результаті бойових дій утворюються значні обсяги будівельних відходів, залишків бетону, металевих конструкцій, пластмас, азбестовмісних матеріалів та продуктів

горіння. Накопичення таких відходів є джерелом вторинного забруднення атмосферного повітря токсичними речовинами та дрібнодисперсним пилом. У зв'язку з цим необхідним є створення систем сортування, переробки та безпечної утилізації відходів руйнувань із дотриманням екологічних вимог і санітарних норм.

Одним із ефективних заходів покращення екологічного стану територій є рекультивація порушених земель. Внаслідок вибухів, пересування важкої військової техніки та пожеж значні площі ґрунтового покриву зазнали деградації, ущільнення та хімічного забруднення. Рекультивація повинна включати технічний та біологічний етапи відновлення. На технічному етапі здійснюється очищення територій, вирівнювання поверхні та стабілізація ґрунтів, а на біологічному — відновлення рослинного покриву та підвищення родючості ґрунтів шляхом внесення органічних добрив і висадження стійких видів рослин [15, 34, 35, 43].

Особливого значення для покращення якості атмосферного повітря набуває відновлення зелених насаджень та природних екосистем. Лісові масиви, паркові зони та захисні лісосмуги виконують важливу функцію очищення повітря від пилу та токсичних речовин. Рослинність сприяє зниженню концентрацій дрібнодисперсних частинок, поглинанню вуглекислого газу та стабілізації мікроклімату територій. У межах екологічного відновлення доцільним є проведення масштабних програм озеленення, створення нових рекреаційних зон та відновлення пошкоджених природоохоронних територій.

Одним із важливих напрямів післявоєнного екологічного відновлення є модернізація промислової та енергетичної інфраструктури на засадах екологічної безпеки. Під час відбудови підприємств необхідно впроваджувати сучасні технології очищення викидів, енергоефективне обладнання та системи автоматичного контролю забруднення атмосферного повітря. Особливу увагу слід приділяти розвитку відновлюваної енергетики, що дозволить зменшити залежність від викопного палива та скоротити обсяги викидів забруднюючих речовин.

Важливою складовою екологічного відновлення є удосконалення системи екологічного моніторингу та прогнозування. Створення сучасної автоматизованої мережі спостережень за якістю атмосферного повітря дозволить своєчасно виявляти нові осередки забруднення та оцінювати ефективність природоохоронних заходів. Доцільним є використання GIS-технологій, супутникового моніторингу та математичного моделювання для прогнозування поширення забруднювачів і оцінки екологічних ризиків.

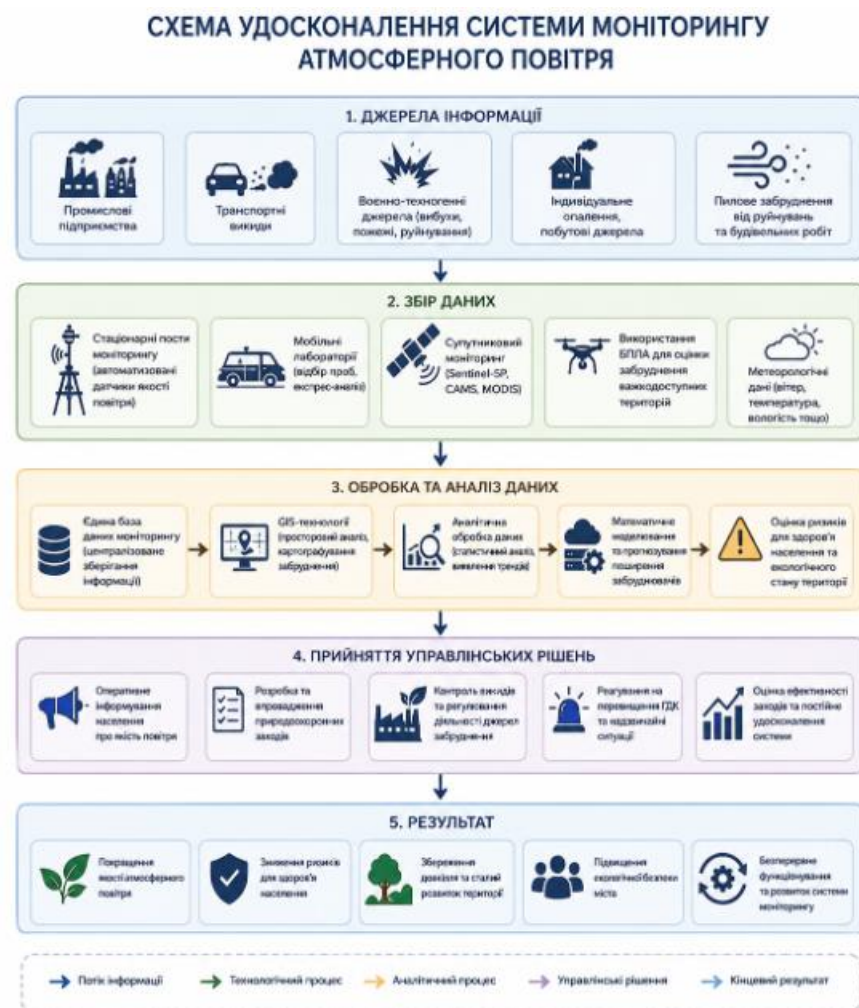


Рис. 3.2 Схеми удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря

Для забезпечення сталого екологічного відновлення необхідним є підвищення рівня екологічної свідомості населення та залучення громадськості до природоохоронної діяльності. Проведення екологічних інформаційних кампаній, розвиток волонтерських екологічних ініціатив та участь місцевих

громад у процесах відновлення територій сприятимуть формуванню відповідального ставлення до навколишнього середовища та підвищенню ефективності природоохоронних заходів.



Рис. 3.3 Запропоновані технології моніторингу

Для оцінки ефективності екологічного відновлення територій можна використати умовний показник зниження рівня забруднення атмосферного повітря після реалізації комплексу природоохоронних заходів. Якщо початковий рівень концентрації $PM_{2.5}$ у постраждалому районі становив 0,090

мг/м³, а після проведення рекультивації, озеленення та очищення територій знизився до 0,054 мг/м³, ефективність відновлення визначається за формулою:

$$E = \frac{C_{\text{поч}} - C_{\text{після}}}{C_{\text{поч}}} \cdot 100\%$$

де

E — ефективність екологічного відновлення, %;

$C_{\text{поч}}$ — початкова концентрація забруднювача, мг/м³;

$C_{\text{після}}$ — концентрація після реалізації заходів, мг/м³. (4.3)

Підставивши значення у формулу, отримуємо:

$$E = \frac{0,090 - 0,054}{0,090} \cdot 100\% = 40\%$$

Отже, реалізація комплексу заходів екологічного відновлення дозволяє знизити рівень забруднення атмосферного повітря приблизно на 40 %, що свідчить про високу ефективність запропонованих природоохоронних рішень.

Таким чином, екологічне відновлення територій, що постраждали внаслідок бойових дій, повинно здійснюватися на основі комплексного та науково обґрунтованого підходу. Реалізація запропонованих заходів сприятиме поступовому відновленню якості атмосферного повітря, зниженню екологічних ризиків для населення, стабілізації стану природних екосистем та забезпеченню екологічно безпечного розвитку постраждалих регіонів України.

3.4. Перспективи впровадження сучасних технологій очищення атмосферного повітря

В умовах сучасних бойових дій проблема забруднення атмосферного повітря в Україні набула критичного характеру. За даними міжнародних екологічних організацій та супутникових систем моніторингу Sentinel-5P і Copernicus Atmosphere Monitoring Service, після початку повномасштабних бойових дій у багатьох регіонах України спостерігалось суттєве зростання концентрацій діоксиду азоту (NO_2), дрібнодисперсного пилу $\text{PM}_{2.5}$, оксидів сірки та продуктів горіння. Найбільші перевищення фіксувалися у районах активних бойових дій, поблизу промислових центрів, нафтобаз, теплоелектростанцій та місць масштабних пожеж. У зв'язку з цим одним із пріоритетних напрямів післявоєнного відновлення України є впровадження сучасних технологій очищення атмосферного повітря та модернізація систем екологічної безпеки.

За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я, забруднення атмосферного повітря є одним із головних факторів передчасної смертності населення. Дрібнодисперсні частинки $\text{PM}_{2.5}$ здатні проникати глибоко у легені та кровоносну систему, спричиняючи розвиток бронхолегеневих, серцево-судинних та онкологічних захворювань. Під час пожеж і вибухів у повітря додатково потрапляють бенз(а)пірен, діоксини, фурани, важкі метали та канцерогенні органічні сполуки. Саме тому сучасні технології очищення повітря повинні бути орієнтовані не лише на зменшення пилового навантаження, а й на комплексне видалення токсичних газоподібних забруднювачів.

Одним із найбільш ефективних методів очищення промислових викидів є використання електрофільтрів. Сучасні електрофільтри забезпечують уловлювання до 99 % твердих частинок, включаючи $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} . Принцип їх роботи полягає у зарядженні пилових частинок у високовольтному електричному полі та подальшому осадженні на спеціальних електродах. Такі

системи широко використовуються на теплоелектростанціях, металургійних комбінатах та цементних заводах. Наприклад, у країнах Європейського Союзу впровадження високоефективних електрофільтрів дозволило зменшити пилові викиди енергетичних підприємств більш ніж у 10 разів порівняно з показниками 1990-х років.

Не менш важливими є рукавні фільтри, які забезпечують механічне очищення газових потоків від пилу та аерозолів. Ефективність сучасних рукавних фільтрів може перевищувати 99,5 %. Вони здатні затримувати надзвичайно дрібні частинки, що особливо актуально в умовах зростання кількості пожеж і руйнувань будівельних конструкцій. У багатьох країнах світу такі системи є обов'язковими для підприємств цементної, хімічної та металургійної промисловості.

Перспективним напрямом є впровадження систем десульфуризації димових газів. Основним джерелом діоксиду сірки є спалювання вугілля та мазуту на теплоелектростанціях. SO_2 є одним із головних компонентів кислотних дощів, які негативно впливають на рослинність, водні об'єкти та ґрунти. Сучасні установки мокрої десульфуризації дозволяють знижувати концентрацію діоксиду сірки у викидах на 90–98 %. Найбільш поширеним є вапняковий метод очищення, у якому SO_2 зв'язується карбонатом кальцію з утворенням гіпсу, що може використовуватися у будівельній галузі [13, 14, 21, 24, 25].

Для зменшення викидів оксидів азоту перспективним є використання технологій селективного каталітичного відновлення NO_x . Такі установки працюють за участю каталізаторів та аміаку, у результаті чого оксиди азоту перетворюються на молекулярний азот і воду. Ефективність технології може перевищувати 90 %. Враховуючи значне збільшення концентрацій NO_2 у районах бойових дій через вибухи, пожежі та роботу дизельної техніки, впровадження подібних систем є надзвичайно актуальним для України [13, 14, 21, 24, 32].

Важливим напрямом розвитку є використання адсорбційних технологій очищення повітря. Для видалення летких органічних сполук, бензолу, формальдегіду та токсичних продуктів горіння широко застосовується активоване вугілля, цеоліти та інші пористі матеріали. Сучасні адсорбційні установки можуть використовуватися як на промислових підприємствах, так і у системах очищення повітря громадських будівель та укриттів. Особливо перспективним є використання наноматеріалів і фотокаталітичних покриттів, здатних руйнувати органічні забруднювачі під дією ультрафіолетового випромінювання.

У сучасних умовах значної уваги набувають біотехнологічні методи очищення атмосферного повітря. Біофільтри використовують спеціальні мікроорганізми для розкладання органічних сполук і газоподібних забруднювачів. Такі системи характеризуються низьким енергоспоживанням та екологічною безпечністю. Вони активно використовуються у країнах ЄС для очищення повітря на сміттєпереробних підприємствах, очисних спорудах та хімічних виробництвах.

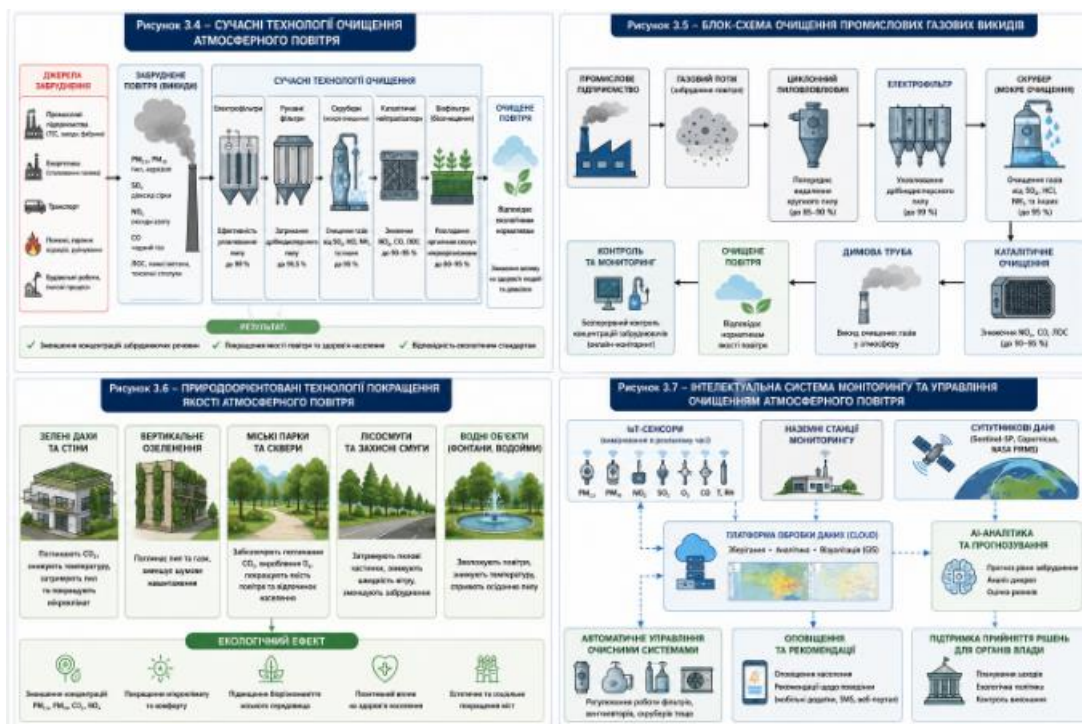


Рис. 3.4 Перспективи впровадження сучасних технологій очищення атмосферного повітря

Перспективним напрямом є також створення «зелених» систем очищення повітря у міському середовищі. Відомо, що один гектар зелених насаджень може поглинати до 70 т пилю на рік. Дерев та чагарники здатні затримувати дрібнодисперсні частинки, поглинати вуглекислий газ та частково нейтралізувати токсичні гази. Особливо ефективними для очищення повітря є липа, клен, тополя, каштан та хвойні насадження. У багатьох країнах активно впроваджуються технології вертикального озеленення, «зелених» дахів та екологічних фасадів, що дозволяє покращувати мікроклімат міст і знижувати концентрацію забруднювачів.

Одним із найбільш інноваційних напрямів є інтеграція цифрових технологій та штучного інтелекту у системи очищення атмосферного повітря. Використання IoT-сенсорів та автоматизованих систем управління дозволяє у режимі реального часу контролювати параметри викидів та автоматично регулювати роботу очисного обладнання. Системи штучного інтелекту можуть прогнозувати рівень забруднення залежно від метеорологічних умов та оптимізувати режими роботи підприємств для мінімізації екологічного навантаження.

Важливе значення має декарбонізація економіки та розвиток відновлюваної енергетики. За даними Міжнародного енергетичного агентства, перехід до сонячної та вітрової енергетики дозволяє скоротити викиди оксидів азоту та діоксиду сірки більш ніж на 80 %. Для України розвиток відновлюваних джерел енергії є не лише екологічним, а й стратегічним напрямом енергетичної безпеки в умовах воєнних ризиків.

Для оцінки ефективності сучасних технологій очищення атмосферного повітря використовується показник ступеня очищення:

$$\eta = \frac{C_{\text{до}} - C_{\text{після}}}{C_{\text{до}}} \cdot 100\%$$

де

η — ефективність очищення, %;

$C_{\text{до}}$ — концентрація забруднювача до очищення, мг/м³;

$C_{\text{після}}$ — концентрація після очищення, мг/м³. (4.4)

Якщо концентрація пилу до очищення становила 200 мг/м³, а після проходження через систему електрофільтра знизилась до 8 мг/м³, ефективність очищення становитиме:

$$\eta = \frac{180 - 12}{180} \cdot 100\%$$

Отримані результати свідчать про високу ефективність сучасних природоохоронних технологій та необхідність їх активного впровадження у процесі післявоєнного відновлення України.

Отже, перспективи впровадження сучасних технологій очищення атмосферного повітря пов'язані з комплексною модернізацією промисловості, розвитком екологічної інфраструктури, цифровізацією систем екологічного контролю та переходом до низьковуглецевої економіки. Реалізація таких заходів дозволить суттєво знизити рівень техногенного навантаження, покращити стан атмосферного повітря та забезпечити екологічно безпечний розвиток України у післявоєнний період.

3.5. Доцільність та результативність впровадження систем захисту атмосферного повітря в умовах воєнного стану та після закінчення бойових дій

Впровадження систем захисту атмосферного повітря в умовах воєнного стану та у післявоєнний період є одним із ключових напрямів забезпечення екологічної безпеки держави, збереження здоров'я населення та стабілізації стану навколишнього природного середовища. Актуальність таких заходів обумовлена масштабним зростанням техногенного навантаження на атмосферне повітря внаслідок бойових дій, руйнування промислових підприємств, енергетичної інфраструктури, транспортних об'єктів, складів паливно-мастильних матеріалів та виникнення численних пожеж. У сучасних умовах атмосферне повітря зазнає комплексного впливу пилових, газоподібних та токсичних органічних забруднювачів, що створює значні ризики для населення та природних екосистем.

Доцільність впровадження систем захисту атмосферного повітря в умовах воєнного стану визначається необхідністю оперативного контролю рівня забруднення, мінімізації поширення токсичних речовин та зниження екологічних ризиків у районах ведення бойових дій. У процесі руйнування будівель, вибухів боєприпасів і горіння нафтопродуктів в атмосферу потрапляють оксиди азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки, дрібнодисперсний пил PM_{2.5} та PM₁₀, важкі метали, бенз(а)пірен, формальдегід та інші небезпечні сполуки. За відсутності ефективних систем захисту та моніторингу концентрації таких речовин можуть перевищувати гранично допустимі норми у декілька разів, що спричиняє погіршення санітарно-гігієнічного стану територій та підвищення рівня захворюваності населення.

Особливого значення в умовах воєнного стану набуває впровадження автоматизованих систем екологічного моніторингу атмосферного повітря. Використання сучасних станцій контролю дозволяє забезпечити безперервне вимірювання концентрацій основних забруднювальних речовин у режимі реального часу. Такі системи можуть функціонувати автономно, передавати

інформацію до єдиних центрів обробки даних та забезпечувати оперативне реагування у випадках різкого погіршення якості повітря. В умовах часткового руйнування стаціонарної інфраструктури важливу роль відіграють мобільні лабораторії та дистанційні методи спостереження, зокрема супутниковий моніторинг та використання безпілотних літальних апаратів.

Результативність впровадження систем захисту атмосферного повітря проявляється у зниженні рівня екологічної небезпеки, підвищенні ефективності контролю за джерелами викидів та своєчасному виявленні зон підвищеного забруднення. Завдяки функціонуванню сучасних систем моніторингу стає можливим прогнозування поширення токсичних хмар, оцінка ризиків для населення та прийняття оперативних управлінських рішень щодо евакуації населення або обмеження перебування людей у небезпечних районах. Крім того, отримані дані можуть використовуватися для формування екологічних карт забруднення, оцінки довгострокових наслідків бойових дій та визначення пріоритетних територій для проведення природоохоронних заходів.

У післявоєнний період системи захисту атмосферного повітря набувають стратегічного значення у процесі екологічного відновлення територій. Масштабне руйнування промислових об'єктів, транспортної інфраструктури та житлового фонду формує значний обсяг вторинного пилового та хімічного забруднення, яке може зберігатися у навколишньому середовищі протягом тривалого часу. У зв'язку з цим виникає необхідність модернізації існуючих систем очищення викидів, реконструкції підприємств із впровадженням сучасних екологічно безпечних технологій та створення інтегрованої системи моніторингу довкілля.

Ефективність післявоєнного впровадження систем захисту атмосферного повітря значною мірою залежить від використання сучасних технологій очищення газових викидів. До найбільш результативних методів належать електрофільтрація, адсорбція, абсорбція, каталітичне очищення, циклонні установки та системи багатоступеневого пиловловлювання. Застосування таких технологій дозволяє суттєво зменшити концентрацію

твердих завислих частинок, оксидів сірки, оксидів азоту та канцерогенних органічних сполук у промислових викидах. Особливо важливим є впровадження енергоефективних і маловідходних технологій, які забезпечують одночасне зниження антропогенного навантаження та раціональне використання ресурсів.

Важливим напрямом підвищення ефективності систем захисту атмосферного повітря є розвиток зелених насаджень та створення природних бар'єрів забруднення. Озеленення територій сприяє поглинанню пилу, вуглекислого газу та токсичних речовин, покращує мікрокліматичні умови та підвищує стійкість урбанізованих екосистем. У післявоєнний період особливу роль відіграватиме відновлення пошкоджених лісових масивів, парків, полезахисних смуг та природоохоронних територій, які виконують функції природного очищення атмосферного повітря.

Отже, впровадження систем захисту атмосферного повітря в умовах воєнного стану та після завершення бойових дій є необхідною умовою забезпечення екологічної безпеки та стабілізації стану довкілля. Використання сучасних систем моніторингу, технологій очищення викидів та природоохоронних заходів дозволяє суттєво знизити негативний вплив бойових дій на атмосферне повітря, підвищити рівень захисту населення та створити передумови для ефективного післявоєнного екологічного відновлення територій України.

РОЗДІЛ V. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

5.1 Загальні вимоги охорони праці під час проведення польових досліджень

Польові дослідження є невід'ємною складовою екологічного моніторингу та науково-дослідних робіт, пов'язаних з оцінкою стану атмосферного повітря, ґрунтів, поверхневих вод та інших компонентів навколишнього природного середовища. Отримані під час польових досліджень дані використовуються для оцінки екологічного стану територій, визначення рівнів антропогенного навантаження, прогнозування змін довкілля та розробки природоохоронних заходів. У зв'язку з цим особливого значення набуває забезпечення безпечних умов праці під час виконання польових робіт.

Проведення польових досліджень характеризується підвищеним рівнем професійного ризику, оскільки працівники виконують роботи безпосередньо на відкритій місцевості, часто у віддалених районах або на територіях, які зазнали впливу надзвичайних ситуацій техногенного чи воєнного характеру. На відміну від лабораторних умов, у польових умовах значна кількість факторів не підлягає повному контролю, що потребує особливої уваги до питань охорони праці та управління ризиками.

До основних небезпечних та шкідливих факторів під час проведення польових досліджень належать несприятливі метеорологічні умови, підвищена або знижена температура повітря, атмосферні опади, сильний вітер, підвищена сонячна радіація, запиленість повітряного середовища, контакт із токсичними речовинами, дія шуму та вібрації від транспортних засобів і спеціального обладнання. Крім того, додаткову небезпеку становлять нерівності рельєфу місцевості, заболочені ділянки, круті схили, густі зарості рослинності та інші природні перешкоди, які можуть стати причиною травмування працівників.

Особливої актуальності питання охорони праці набувають під час проведення екологічних досліджень на територіях, що постраждали внаслідок

бойових дій. У таких районах існує підвищений ризик контакту із забрудненими ґрунтами, продуктами горіння, токсичними речовинами, залишками паливно-мастильних матеріалів, уламками будівельних конструкцій та вибухонебезпечними предметами. У результаті руйнування промислових підприємств можливе потрапляння у навколишнє середовище важких металів, нафтопродуктів, кислот, лугів та інших небезпечних хімічних сполук, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників.

До виконання польових досліджень допускаються особи, які пройшли медичний огляд, вступний та первинний інструктажі з охорони праці, ознайомлені з особливостями маршруту досліджень, правилами користування вимірювальним обладнанням та засобами індивідуального захисту. Працівники повинні володіти навичками надання домедичної допомоги, знати порядок дій у разі виникнення аварійних ситуацій та вміти користуватися засобами зв'язку й навігації.

Перед початком польових робіт необхідно здійснити оцінку потенційних ризиків, визначити безпечні маршрути пересування, перевірити стан транспортних засобів, засобів зв'язку та вимірювального обладнання. Особлива увага приділяється аналізу оперативної інформації щодо безпекової ситуації в районі проведення досліджень. У разі виконання робіт на територіях, які зазнали впливу бойових дій, необхідно попередньо отримати інформацію про проведення розмінування місцевості та відсутність вибухонебезпечних предметів.

Під час проведення польових досліджень працівники повинні використовувати спеціальний одяг та взуття, які забезпечують захист від механічних пошкоджень, несприятливих погодних умов та контакту із забруднюючими речовинами. Залежно від характеру робіт використовуються захисні рукавички, каски, окуляри, сигнальні жилети та засоби захисту органів дихання. Для виконання досліджень у районах із підвищеним рівнем запиленості або задимлення рекомендується застосування фільтрувальних напівмасок класу FFP2 або FFP3.

Особливу небезпеку для працівників становлять дрібнодисперсні частинки $PM_{2.5}$ та PM_{10} , які можуть утворюватися внаслідок пожеж, руйнування будівель та вибухів боєприпасів. Завдяки малим розмірам такі частинки здатні проникати у нижні відділи дихальної системи та викликати розвиток професійних захворювань органів дихання. Тому під час відбору проб атмосферного повітря у районах підвищеного забруднення необхідним є використання ефективних засобів індивідуального захисту органів дихання та обмеження тривалості перебування персоналу в небезпечних зонах.

Для забезпечення належного рівня безпеки роботи рекомендується проводити у складі групи не менше двох осіб. Учасники досліджень повинні підтримувати постійний зв'язок між собою, а також із відповідальними особами, які координують виконання робіт. Усі маршрути пересування та місця проведення досліджень повинні бути заздалегідь погоджені та документально зафіксовані.

Дотримання вимог охорони праці під час проведення польових досліджень є необхідною умовою збереження життя і здоров'я працівників, підвищення ефективності екологічного моніторингу та забезпечення достовірності отриманих результатів досліджень. Комплексний підхід до організації безпечних умов праці дозволяє мінімізувати вплив небезпечних факторів та забезпечити належний рівень виробничої безпеки навіть в умовах підвищених екологічних і техногенних ризиків.

5.2 Небезпечні та шкідливі фактори під час польових досліджень

Проведення польових досліджень пов'язане з впливом значної кількості небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників, знижувати ефективність виконання робіт та створювати загрозу виникнення нещасних випадків. Особливої актуальності питання виробничої безпеки набувають під час екологічних досліджень

територій, що постраждали внаслідок бойових дій, техногенних аварій або масштабних пожеж.

Небезпечні фактори, які можуть виникати під час польових досліджень, умовно поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. Кожна з цих груп факторів має свої особливості впливу на організм людини та потребує застосування відповідних профілактичних заходів.

До фізичних небезпечних факторів належать несприятливі метеорологічні умови, підвищена або знижена температура навколишнього середовища, підвищена вологість повітря, атмосферні опади, сильний вітер, інтенсивне сонячне випромінювання, підвищений рівень шуму та вібрації. Під час проведення польових робіт у літній період працівники можуть піддаватися перегріванню організму та тепловому удару. Тривале перебування під прямими сонячними променями без використання засобів захисту може спричинити сонячні опіки, зневоднення організму та погіршення загального самопочуття. У холодний період року існує ризик переохолодження організму, обмороження відкритих ділянок тіла та розвитку простудних захворювань.

Важливим фізичним фактором є підвищена запиленість атмосферного повітря. Особливо небезпечними є дрібнодисперсні частинки $PM_{2.5}$ та PM_{10} , які утворюються внаслідок руйнування будівель, дорожнього покриття, пожеж та вибухів. Такі частинки можуть тривалий час перебувати у повітрі та проникати глибоко в дихальну систему людини. Постійний вплив пилу може викликати подразнення слизових оболонок, розвиток алергічних реакцій, бронхітів та інших захворювань органів дихання.

До хімічних небезпечних факторів належить вплив токсичних речовин, які можуть бути присутніми у повітрі, ґрунті або на поверхні досліджуваних об'єктів. На територіях, що постраждали внаслідок бойових дій, особливу небезпеку становлять оксиди азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки, важкі метали, нафтопродукти, канцерогенні органічні сполуки та продукти горіння полімерних матеріалів. Вдихання таких речовин може призводити до гострих

отруєнь, подразнення органів дихання, ураження центральної нервової системи та розвитку хронічних захворювань.

Окрему небезпеку становлять продукти горіння нафтопродуктів, пластмас, гуми та будівельних матеріалів. Під час пожеж в атмосферне повітря можуть надходити бенз(а)пірен, формальдегід, діоксини, фурани та інші токсичні сполуки. Багато з цих речовин мають канцерогенні властивості та здатні накопичуватися в організмі людини протягом тривалого часу.

Під час проведення польових досліджень у районах бойових дій додаткову небезпеку становлять залишки вибухових речовин та продуктів детонації боєприпасів. У місцях інтенсивних обстрілів можливе накопичення сполук свинцю, міді, цинку, кадмію та інших металів, які потрапляють у навколишнє середовище внаслідок руйнування боєприпасів та військової техніки. Контакт із такими речовинами може спричиняти токсичний вплив на організм людини.

До біологічних факторів належать патогенні мікроорганізми, грибки, бактерії, віруси, кліщі, комахи та інші біологічні агенти. Під час роботи у лісових масивах, прибережних зонах та на занедбаних територіях існує ризик укусів кліщів і комах, які можуть бути переносниками інфекційних захворювань. Також небезпеку становить контакт із забрудненими поверхневими водами та ґрунтами.

Значний вплив на безпеку працівників мають психофізіологічні фактори. До них належать підвищене нервово-емоційне навантаження, тривале перебування у несприятливих умовах, висока відповідальність за результати досліджень, фізична втома та стресові ситуації. Особливо це актуально під час виконання робіт у районах, які зазнали впливу бойових дій. Постійне усвідомлення потенційної небезпеки може негативно впливати на увагу, швидкість реакції та загальний психоемоційний стан працівників.

Особливе місце серед небезпечних факторів займає ризик виявлення вибухонебезпечних предметів. На територіях, де проводилися бойові дії, можуть залишатися нерозірвані боєприпаси, міни, касетні елементи та інші

вибухонебезпечні предмети. Такі об'єкти становлять безпосередню загрозу життю та здоров'ю працівників. Тому проведення польових досліджень на таких територіях допускається лише після проведення розмінування та офіційного підтвердження безпечності місцевості відповідними службами.

Небезпечним фактором є також пересування транспортними засобами до місць проведення досліджень. Значна частина польових маршрутів проходить дорогами з пошкодженим покриттям, що підвищує ризик дорожньо-транспортних пригод. Крім того, можливими є обвали конструкцій, провали ґрунту, падіння дерев та інші небезпечні ситуації, спричинені руйнуванням інфраструктури.

Отже, польові дослідження характеризуються комплексним впливом різноманітних небезпечних та шкідливих факторів. Їх своєчасне виявлення, оцінка та врахування під час організації робіт є необхідною умовою забезпечення належного рівня охорони праці, збереження здоров'я працівників та ефективного виконання екологічних досліджень.

5.3 Заходи безпеки під час проведення польових досліджень

Забезпечення безпечних умов праці під час проведення польових досліджень є одним із найважливіших завдань організації екологічного моніторингу. Ефективність польових робіт значною мірою залежить від рівня підготовки персоналу, дотримання встановлених вимог охорони праці, своєчасного виявлення потенційних небезпек та застосування комплексу організаційних і технічних заходів безпеки.

До початку виконання польових досліджень необхідно здійснити ретельне планування робіт. На підготовчому етапі проводиться аналіз території дослідження, визначаються потенційні небезпечні фактори, розробляються маршрути пересування та складається план виконання робіт. Особлива увага

приділяється оцінці безпекової ситуації на територіях, що зазнали впливу бойових дій, техногенних аварій або пожеж.

Перед початком польових робіт працівники повинні пройти інструктаж з охорони праці та ознайомитися з особливостями місцевості, маршрутом пересування, правилами експлуатації обладнання та порядком дій у разі виникнення аварійних ситуацій. Усі учасники досліджень повинні бути проінформовані про можливі ризики та способи їх мінімізації.

Обов'язковою умовою безпечного виконання робіт є перевірка технічного стану вимірювального обладнання, засобів зв'язку, навігаційних приладів та транспортних засобів. Несправне обладнання може не лише призвести до отримання недостовірних результатів досліджень, але й створити додаткову загрозу для працівників.

Важливим заходом безпеки є забезпечення працівників засобами індивідуального захисту. Залежно від характеру робіт використовуються захисний одяг, рукавички, каски, окуляри, сигнальні жилети та засоби захисту органів дихання. У районах підвищеної запиленості або задимлення рекомендується застосування респіраторів із високим ступенем фільтрації, здатних затримувати дрібнодисперсні частинки та токсичні аерозолі.

Під час роботи на відкритій місцевості необхідно враховувати погодні умови. Проведення досліджень під час сильного вітру, грози, злив, ожеледиці або надзвичайно високих температур може створювати додаткові ризики для здоров'я працівників. У таких випадках роботи повинні бути тимчасово припинені до стабілізації погодних умов.

Особливі вимоги безпеки встановлюються для досліджень на територіях, які постраждали внаслідок бойових дій. Перед початком робіт необхідно отримати підтвердження про відсутність вибухонебезпечних предметів та проведення відповідних заходів з розмінування території. Працівникам категорично забороняється торкатися підозрілих предметів, уламків боєприпасів або залишків військової техніки. У разі їх виявлення необхідно

негайно припинити роботи, залишити небезпечну ділянку та повідомити відповідні служби.

Для забезпечення оперативного реагування на надзвичайні ситуації кожна польова група повинна бути забезпечена мобільними засобами зв'язку, картографічними матеріалами, GPS-навігаторами та аптечкою першої допомоги. Під час проведення робіт у віддалених районах рекомендується використовувати резервні джерела живлення та альтернативні канали зв'язку.

Важливим елементом безпеки є дотримання режиму праці та відпочинку. Тривале перебування на відкритій місцевості може спричиняти фізичне перевантаження, втому та зниження концентрації уваги. Для запобігання таким явищам необхідно організовувати регулярні перерви, забезпечувати працівників питною водою та створювати умови для відпочинку.

Таким чином, виконання комплексу організаційних, технічних та профілактичних заходів дозволяє значно знизити рівень професійних ризиків і забезпечити безпечне проведення польових екологічних досліджень навіть в умовах підвищеної небезпеки.

5.4 Пожежна безпека та дії у надзвичайних ситуаціях

Питання пожежної безпеки мають особливе значення під час проведення польових досліджень, оскільки значна частина робіт виконується на відкритій місцевості, у лісових масивах, степових районах та на територіях із підвищеним рівнем пожежної небезпеки. Додаткові ризики виникають у регіонах, що зазнали впливу бойових дій, де існує висока ймовірність виникнення пожеж унаслідок детонації боєприпасів, пошкодження інфраструктури або загоряння сухої рослинності.

Основними причинами виникнення пожеж під час польових робіт можуть бути необережне поводження з відкритим вогнем, використання несправного обладнання, порушення правил експлуатації транспортних засобів та вплив

зовнішніх факторів природного або техногенного характеру. Для запобігання пожежам необхідно суворо дотримуватися вимог пожежної безпеки та постійно контролювати стан навколишнього середовища.

Під час проведення досліджень забороняється розведення багать, спалювання відходів, використання відкритого вогню поблизу сухої рослинності, паливно-мастильних матеріалів та інших легкозаймистих речовин. Усі джерела потенційного займання повинні перебувати під постійним контролем відповідальних осіб.

Особлива увага повинна приділятися роботам у періоди підвищеної пожежної небезпеки. У спекотну та суху погоду навіть незначне джерело займання може спричинити масштабну пожежу. Тому перед початком робіт необхідно оцінювати рівень пожежної небезпеки території та враховувати прогнози метеорологічних служб.

Кожна польова група повинна бути забезпечена первинними засобами пожежогасіння. До таких засобів належать вогнегасники, ємності з водою, протипожежні покривала та інший інвентар, необхідний для ліквідації невеликих осередків займання на початковій стадії їх розвитку.

У разі виникнення пожежі необхідно негайно повідомити службу порятунку за номером 101, визначити напрямок поширення вогню та організувати евакуацію людей із небезпечної зони. За наявності можливості та відсутності загрози життю працівників допускається використання первинних засобів пожежогасіння для локалізації займання до прибуття підрозділів ДСНС.

Під час евакуації необхідно діяти організовано, уникати паніки та суворо виконувати вказівки керівника робіт. Особлива увага приділяється обліку всіх учасників польової групи та контролю за їх безпечним переміщенням до визначених пунктів збору.

У випадку виникнення інших надзвичайних ситуацій, зокрема травмування працівників, отруєння токсичними речовинами, виявлення вибухонебезпечних предметів або різкого погіршення погодних умов, роботи повинні бути негайно припинені. Потерпілому необхідно надати домедичну

допомогу відповідно до характеру отриманих ушкоджень та забезпечити його транспортування до найближчого медичного закладу.

Дотримання вимог пожежної безпеки та чітке виконання алгоритмів дій у надзвичайних ситуаціях є важливою умовою збереження життя і здоров'я працівників, а також забезпечення безпечного проведення польових екологічних досліджень.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи на тему «Оцінка впливу бойових дій на якість атмосферного повітря в Україні та розробка заходів щодо його відновлення» було проведено комплексне дослідження сучасного стану атмосферного повітря в умовах воєнного стану, проаналізовано основні джерела та склад забруднення, здійснено оцінку екологічних ризиків для населення і довкілля, а також розроблено науково обґрунтовані заходи щодо покращення якості атмосферного повітря та післявоєнного екологічного відновлення територій України.

У ході дослідження встановлено, що бойові дії формують потужне техногенне навантаження на атмосферне повітря та є одним із найбільш небезпечних антропогенних факторів впливу на довкілля. На відміну від традиційного промислового забруднення, воєнне забруднення характеризується високою інтенсивністю, аварійністю, просторовою масштабністю та складним багатокomпонентним складом викидів. Основними джерелами забруднення атмосферного повітря є вибухи боєприпасів, масштабні пожежі, руйнування промислових підприємств, енергетичних об'єктів, житлової інфраструктури, складів паливно-мастильних матеріалів та функціонування військової техніки.

У роботі встановлено, що внаслідок бойових дій у атмосферне повітря потрапляють значні обсяги оксидів азоту (NO_x), оксиду вуглецю (CO), діоксиду сірки (SO_2), дрібнодисперсного пилу $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} , летких органічних сполук, бенз(а)пірену, діоксинів, важких металів та інших токсичних компонентів. Особливу небезпеку становлять дрібнодисперсні аерозолі $\text{PM}_{2.5}$, які здатні проникати у кровоносну систему людини та викликати серцево-судинні, бронхолегеневі та онкологічні захворювання. У роботі показано, що концентрації $\text{PM}_{2.5}$ у районах активних бойових дій можуть перевищувати нормативні значення у декілька разів.

Під час аналізу сучасного стану атмосферного повітря України встановлено, що найбільшого негативного впливу зазнали Херсонська, Донецька, Луганська, Харківська, Запорізька та Миколаївська області. Для детального дослідження було обрано місто Херсон, яке в умовах воєнного стану характеризується складною екологічною ситуацією. Встановлено, що природно-кліматичні особливості регіону, зокрема посушливий степовий клімат, висока температура повітря та значна швидкість вітру, сприяють інтенсивному поширенню пилових аерозолів та токсичних продуктів горіння на значні відстані.

У процесі роботи проведено аналіз основних забруднювальних речовин та їх впливу на здоров'я населення. Встановлено, що найбільш небезпечними для населення є дрібнодисперсний пил, оксиди азоту, діоксид сірки, леткі органічні сполуки та важкі метали. Доведено, що комплексний вплив декількох токсичних речовин одночасно створює синергетичний ефект, який значно посилює негативний вплив на організм людини та природні екосистеми. Особливо небезпечним є довготривалий характер воєнного забруднення, оскільки токсичні речовини можуть накопичуватися у ґрунтах, водних об'єктах та атмосферному середовищі протягом тривалого часу.

У роботі проведено порівняльний аналіз показників забруднення атмосферного повітря до та після початку бойових дій. Результати дослідження свідчать про суттєве зростання концентрацій основних забруднювачів у повітрі. Зокрема, умовні розрахунки показали, що середня концентрація $PM_{2.5}$ у досліджуваному районі зросла з $0,018 \text{ мг/м}^3$ до $0,072 \text{ мг/м}^3$, тобто у 4 рази, що значно перевищує рекомендовані нормативи ВООЗ. Концентрація діоксиду азоту збільшилася приблизно у 2,5 раза, а рівень чадного газу — більш ніж удвічі. Найвищі показники забруднення спостерігалися під час масштабних пожеж та інтенсивних обстрілів.

У роботі виконано оцінку екологічних ризиків для населення та довкілля. Встановлено, що найбільшу небезпеку становлять райони поблизу місць руйнування промислових підприємств, енергетичних об'єктів та складів

паливно-мастильних матеріалів. Проведені розрахунки показали, що сумарний індекс забруднення атмосфери у районах активних бойових дій перевищує фонові показники у декілька разів, що свідчить про високий рівень екологічної небезпеки та необхідність впровадження комплексних природоохоронних заходів.

Особливу увагу в роботі приділено удосконаленню системи моніторингу атмосферного повітря. Запропоновано концептуальну модель інтегрованої системи моніторингу, яка включає використання супутникових даних Sentinel-5P, Copernicus Atmosphere Monitoring Service та NASA FIRMS, автоматизованих наземних станцій спостереження, мобільних екологічних лабораторій, GIS-технологій та математичного прогнозування. Проведені розрахунки показали, що впровадження автоматизованої системи моніторингу дозволяє скоротити середній час виявлення небезпечного забруднення з 12 до 2 годин, тобто підвищити оперативність реагування у 6 разів.

У межах роботи було розроблено комплекс заходів щодо покращення якості атмосферного повітря та екологічного відновлення постраждалих територій. Запропоновані заходи включають рекультивацію порушених земель, очищення територій від будівельних і токсичних відходів, масштабне озеленення, модернізацію промислових підприємств, впровадження сучасних систем очищення викидів та розвиток відновлюваної енергетики. Проведені розрахунки показали, що реалізація комплексу природоохоронних заходів дозволяє знизити концентрацію $PM_{2.5}$ з $0,090 \text{ мг/м}^3$ до $0,054 \text{ мг/м}^3$, що відповідає зменшенню рівня забруднення приблизно на 40 %.

У роботі також досліджено перспективи впровадження сучасних технологій очищення атмосферного повітря. Встановлено, що найбільш ефективними є електрофільтри, рукавні фільтри, скрубери, системи десульфуризації та денітрифікації, адсорбційні й біотехнологічні методи очищення. Виконані розрахунки ефективності очищення показали, що сучасні електрофільтри здатні забезпечувати ступінь очищення газових викидів на рівні

93–96 %, що дозволяє суттєво скоротити обсяги надходження пилу та токсичних речовин у атмосферне повітря.

Таким чином, результати проведеного дослідження підтверджують, що бойові дії є одним із найнебезпечніших факторів погіршення якості атмосферного повітря в Україні. Масштабні викиди токсичних речовин, руйнування систем моніторингу, значне зростання концентрацій пилових аерозолів та канцерогенних сполук формують високі ризики для здоров'я населення та природних екосистем. Реалізація запропонованих природоохоронних заходів, модернізація систем екологічного моніторингу та впровадження сучасних технологій очищення атмосферного повітря є необхідною умовою забезпечення екологічної безпеки, зниження техногенного навантаження та ефективного післявоєнного відновлення України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конституція України : Закон України від 28 черв. 1996 р. № 254к/96-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр>.
2. Про охорону атмосферного повітря : Закон України від 16 жовт. 1992 р. № 2707-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12>.
3. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25 черв. 1991 р. № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>.
4. Про систему громадського здоров'я : Закон України від 06 верес. 2022 р. № 2573-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20>.
5. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23 трав. 2017 р. № 2059-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>.
6. ДСТУ ISO 4225:2001. Якість повітря. Загальні положення. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 2001.
7. ДСТУ ISO 4226:2004. Якість повітря. Загальні аспекти. Одиниці вимірювання. Київ : Держспоживстандарт України, 2004.
8. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
9. КНД 211.1.1.106-2003. Організація та здійснення спостережень за забрудненням поверхневих вод (в системі Мінекоресурсів України). Київ, 2003.
10. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Москва : Госкомгидромет, 1991. 693 с.
11. Моніторинг довкілля : підручник / за ред. В. М. Боголюбова. Вінниця : ВНТУ, 2010. 232 с.
12. Клименко М. О., Прищепя А. М., Вознюк Н. М. Моніторинг довкілля : підручник. Київ : Академія, 2006. 360 с.
13. Запорожець О. І. Екологія атмосфери : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2017. 432 с.

14. Філіпенко О. В. Екологічна безпека атмосферного повітря : навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 280 с.
15. Бондар О. І., Машков О. А. Основи екології та екологічної безпеки. Київ : Ліра-К, 2018. 336 с.
16. Семенов В. Ф. Екологічна безпека та моніторинг довкілля : навч. посіб. Київ : Знання, 2013. 299 с.
17. Тарасова В. В., Малиновський А. С., Рибак М. Ф. Екологічна стандартизація і сертифікація. Київ : Центр навчальної літератури, 2018. 276 с.
18. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні. Київ : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua>.
19. Методичні рекомендації з підготовки регіональних та загальнодержавної програм моніторингу довкілля : наказ Мінекоресурсів України від 24 груд. 2001 р. № 487.
20. Національний атлас України. Київ : ДНВП «Картографія», 2007. 440 с.
21. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. Geneva : World Health Organization, 2021.
22. Air Pollution and Child Health: Prescribing Clean Air. Geneva : World Health Organization, 2018.
23. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. Geneva : World Health Organization, 2016.
24. European Environment Agency. Air Pollution Impacts on Human Health and Ecosystems. Copenhagen : EEA, 2024.
25. European Environment Agency. Europe's Air Quality Status Report 2024. Copenhagen : EEA, 2024.
26. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). URL: <https://atmosphere.copernicus.eu>.

27. Sentinel-5P Precursor Satellite Mission. European Space Agency. URL: <https://sentinels.copernicus.eu>.
28. NASA FIRMS – Fire Information for Resource Management System. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>.
29. Air Quality Index (AQI) Basics. United States Environmental Protection Agency. URL: <https://www.airnow.gov>.
30. AERMOD Modeling System. United States Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/scram>.
31. CALPUFF Modeling System. URL: <http://www.src.com/calpuff>.
32. United Nations Environment Programme. Environmental Impacts of the Conflict in Ukraine: Preliminary Review. Nairobi : UNEP, 2022.
33. United Nations Environment Programme. Environmental Assessment of Ukraine: Current and Future Risks. Nairobi : UNEP, 2023.
34. United Nations Development Programme. Assessment of Environmental Damage in Ukraine. New York : UNDP, 2023.
35. World Bank. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment. Washington, D.C. : World Bank Group, 2024.
36. European Commission. Environmental Consequences of the War in Ukraine. Brussels : European Commission, 2023.
37. Environment and Security Initiative (ENVSEC). Environmental Risks and Challenges in Ukraine During Armed Conflict. Geneva, 2023.
38. World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2024. Geneva : WMO, 2025.
39. Copernicus Emergency Management Service. Environmental Monitoring of Ukraine. URL: <https://emergency.copernicus.eu>.
40. NASA Earth Observatory. Satellite Monitoring of Wildfires and Atmospheric Pollution During Armed Conflicts. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov>.
41. European Space Agency. Earth Observation for Environmental Assessment in Ukraine. URL: <https://www.esa.int>.

42. United Nations Economic Commission for Europe. Environmental Performance Reviews: Ukraine. Geneva : UNECE, 2023.

43. Organisation for Economic Co-operation and Development. Environmental Impacts of War and Post-Conflict Recovery. Paris : OECD, 2023.

44. Державна екологічна інспекція України. Методичні підходи до визначення шкоди, заподіяної довкіллю внаслідок надзвичайних ситуацій та воєнних дій. Київ, 2024.

45. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Офіційні матеріали щодо наслідків бойових дій, пожеж та надзвичайних ситуацій. URL: <https://dsns.gov.ua>

ДОДАТКИ

Таблиця Д.1 Порівняння концентрацій $PM_{2.5}$ до та після початку бойових дій

Показник	До бойових дій	Після початку бойових дій
$PM_{2.5}$, мг/м ³	0,018	0,072
NO_2 , мг/м ³	0,021	0,054
CO , мг/м ³	1,1	2,8
SO_2 , мг/м ³	0,012	0,031

Таблиця Д.2 Ефективність сучасних технологій очищення атмосферного повітря

Технологія	Основні забруднювачі	Ефективність очищення
Електрофільтри	$PM_{2.5}$, PM_{10}	95–99 %
Рукавні фільтри	Пил, сажа	99 %
Скрубери	SO_2 , токсичні гази	85–95 %
Каталітичні нейтралізатори	NO_x , CO	90–95 %
Біофільтри	Органічні сполуки	70–90 %

Таблиця Д.3 Основні забруднювачі атмосферного повітря в умовах бойових дій

Забруднювач	Основні джерела	Вплив на здоров'я
$PM_{2.5}$	Вибухи, пожежі	Хвороби легень
PM_{10}	Руйнування будівель	Подразнення дихальних шляхів
NO_2	Вибухи, транспорт	Фотохімічний смог
SO_2	Горіння палива	Кислотні дощі
CO	Неповне згорання	Кисневе голодування
Бенз(а)пірен	Пожежі	Канцерогенний вплив
Важкі метали	Боєприпаси	Токсичний вплив