Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра екології, охорони навколишнього середовища
та здорового способу життя

"Допущено до захисту"
Зав. кафедрою екології, ОНС та ЗСЖ
к.б.н., доцент
_____Ольга МЕДВЕДЄВА
«_____»_____2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему

Оцінка викидів шкідливих речовин в атмосферу внаслідок військових дій

Виконав: здобувач вищої освіти
__4__ курсу, групи __ЕО-21____
ОПП «_____Екологія_____»
спеціальності 101 «Екологія»
_____Євген ГОЛОВЕЦЬКИЙ
«___ ____»_____2025 р.

Керівник роботи:
доцент, канд. с.-г. наук
_____Віталій ГУЛАЙ
«_____»_____2025 р.

Рецензент:
доцент, канд.с.-г.наук
_____Віта РЕЗНІЧЕНКО
«__ _____»_____2025 р.

Кропивницький - 2025

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет Агротехнічний
Кафедра Екології, охорони навколишнього середовища та здорового способу життя
Рівень вищої освіти Бакалавр
Галузь знань 10 Природничі науки
Спеціальність 101 - Екологія
Освітньо-професійна програма Екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____
«_2__»__лютого_ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Головецький Євген Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оцінка викидів шкідливих речовин в атмосферу внаслідок військових дій»
2. Керівник роботи Гулай Віталій Володимирович, к.с.-г.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
3. Строк подання роботи до захисту 31.05.2025 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.

Мета роботи - оцінка рівнів забруднення атмосферного повітря, спричинених військовими діями, шляхом аналізу показників якості повітря з використанням даних платформи EcoCity

Завдання роботи:

1. Проаналізувати наукові джерела щодо забруднення атмосфери в умовах збройних конфліктів.
2. Визначити основні шкідливі речовини, характерні для повітря під час бойових дій.
3. Зібрати і систематизувати дані щодо рівнів забруднення з платформи EcoCity для обраних регіонів.
4. Провести порівняльний аналіз Київської та Полтавської областей за основними показниками.
5. Надати практичні рекомендації щодо удосконалення моніторингу якості повітря в умовах воєнного навантаження.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд інформаційних джерел за обраною темою	17.04.2025 р.	
2	Написання розділу 1.	25.04.2025 р.	
3	Пошук інформації та написання розділу 2.	30.04.2025 р.	
4	Проведення досліджень та написання розділу 3	06.05.2025 р.	
5	Написання розділу 4, оформлення вступу	17.05.2025 р.	
6	Формулювання висновків	20.05.2025 р.	
7	Оформлення пояснювальної записки	24.05.2025 р.	
8	Оформлення слайдів презентації та доповіді	29.05.2025 р.	

Дата видачі завдання
«_2 » __лютого____2025 р.

Підпис керівника
_____ ___Гулай В.В.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання
«_2__» __лютого_____2025 р.

Підпис здобувача _____
_____ __Головецький Є.М.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему «Оцінка викидів шкідливих речовин в атмосферу внаслідок військових дій» Кваліфікаційна робота виконана на 50 сторінках, містить 26 літературних джерел.

Об’єктом роботи є атмосферне повітря в регіонах України, які зазнали різного ступеня впливу воєнних дій.

Метою роботи є оцінка рівнів забруднення атмосферного повітря, спричинених військовими діями, шляхом аналізу показників якості повітря з використанням даних платформи EcoCity.

У вступі обґрунтовано актуальність теми в умовах триваючих бойових дій на території України, сформульовано мету, завдання, об’єкт, предмет та практичну цінність дослідження..

У першому розділі представлено огляд літературних джерел щодо теми дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір регіонів дослідження (Київська і Полтавська області), охарактеризовано природно-кліматичні умови, індикатори моніторингу та функціонал платформи EcoCity.

У третьому розділі представлено результати аналізу динаміки забруднення повітря в обох регіонах, виконано порівняльну оцінку ступеня перевищення норм ВООЗ, візуалізовано екологічні показники у вигляді таблиць і графіків.

У четвертому розділі запропоновано практичні рекомендації.

У висновках узагальнено основні результати роботи згідно із поставленими завданнями.

АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ, ВОЄННІ ДІЇ, ЗАБРУДНЕННЯ, ДРІБНОДИСПЕРСНИЙ ПИЛ, ГРОМАДСЬКИЙ МОНІТОРИНГ, ECOCITY, ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ

ЗМІСТ

ВСТУП……. 6
РОЗДІЛ 1. ВОЄННІ ДІЇ ЯК ЧИННИК АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ……..
1.1. Основні джерела викидів шкідливих речовин у повітря під час бойових дій……..
1.2. Типові забрудники: характеристика і вплив на здоров'я
1.3. Світовий і вітчизняний досвід досліджень воєнного впливу на атмосферу……
1.4. Нормативно-правові засади регулювання якості повітря в Україні
1.5. Роль цифрових екологічних платформ у воєнний час……
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УМОВАХ ВІЙНИ…….
2.1. Загальна характеристика досліджуваних регіонів: Київська і Полтавська області…….
2.2. Обґрунтування вибору індикаторів ($PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, CO, SO_2 тощо)…….
2.3. Інструменти збору даних: огляд функціоналу платформи EcoCity
2.4. Підходи до обробки та інтерпретації екологічних даних у порівняльному форматі……...
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ (НА ПРИКЛАДІ КИЇВСЬКОЇ ТА ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТЕЙ)……..
3.1. Загальні тренди забруднення у Київській області в умовах воєнних дій……..
3.2. Динаміка показників у Полтавській області ……
3.3. Порівняльна оцінка ризику для здоров'я населення обох регіонів
РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ В УМОВАХ ВОЄННОГО НАВАНТАЖЕННЯ……
ВИСНОВКИ……..
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….

ВСТУП

Повномасштабне вторгнення на територію України у 2022 році стало безпрецедентним за впливом на навколишнє середовище. Війна змінила не лише соціально-економічну ситуацію в державі, а й екологічний стан усіх компонентів навколишнього середовища. У переліку найбільш вразливих компонентів на першому місці стоїть атмосферне повітря, яке зазнає безпосереднього забруднення внаслідок бойових дій, пожеж, вибухів, руйнування промислових об'єктів, використання генераторів і перевантаження транспортної інфраструктури [8, 16].

Особливість проблеми полягає в тому, що забруднення атмосфери в умовах війни часто є непомітним візуально, але має потенційно серйозні наслідки для здоров'я населення і функціонування екосистем. У повітря надходять значні обсяги дрібнодисперсних твердих часток ($PM_{2.5}$, PM_{10}), оксидів азоту, сірки, чадного газу, важких металів, органічних сполук – більшість із яких мають токсичну дію або належать до потенційних канцерогенів [4, 17].

На відміну від ґрунтів чи води, атмосферне повітря є рухомим середовищем, що сприяє поширенню забруднюючих речовин на значні відстані, навіть у відносно безпечні території [24]. Тому вивчення просторово-часових змін якості повітря має критичне значення для формування екологічної безпеки як на локальному, так і на національному рівнях.

Саме тому одним із пріоритетів сучасної екологічної науки є моніторинг і оцінка рівня забруднення повітря в умовах війни. Особливо важливим є порівняння регіонів з різною інтенсивністю бойових дій, що дозволяє виявити реальний внесок військового чинника в екологічну ситуацію.

У цій роботі для аналізу обрано Київську область, яка зазнала значних руйнувань на початку повномасштабного вторгнення та періодичних атак у наступні роки, та Полтавську область, яка має менший рівень прямого впливу бойових дій. Порівняльний аналіз дозволяє об'єктивно оцінити просторові контрасти забруднення та наслідки для населення.

Дослідження базується на даних відкритої екологічної платформи EcoCity, що надає можливість здійснювати громадський моніторинг якості повітря в реальному часі, з використанням сенсорів у різних населених пунктах [10].

Метою роботи є оцінка рівнів забруднення атмосферного повітря, спричинених військовими діями, шляхом аналізу показників якості повітря з використанням даних платформи EcoCity.

Для досягнення мети були поставлені такі **завдання**:

1. Проаналізувати наукові джерела щодо забруднення атмосфери в умовах збройних конфліктів.
2. Визначити основні шкідливі речовини, характерні для повітря під час бойових дій.
3. Зібрати і систематизувати дані щодо рівнів забруднення з платформи EcoCity для обраних регіонів.
4. Провести порівняльний аналіз Київської та Полтавської областей за основними показниками.
5. Надати практичні рекомендації щодо удосконалення моніторингу якості повітря в умовах воєнного навантаження.

Об’єкт дослідження - атмосферне повітря в регіонах України, які зазнали різного ступеня впливу воєнних дій.

Предмет дослідження - концентрації типових шкідливих речовин у повітрі в умовах воєнних дій.

Практична цінність роботи полягає у можливості застосування реальних екологічних даних для обґрунтування регіональних стратегій захисту населення, посилення ролі громадського моніторингу як інструменту екологічної безпеки, підвищення поінформованості жителів щодо стану повітря у власному регіоні, використання результатів у подальших наукових, освітніх та управлінських проектах.

РОЗДІЛ 1
ВІЙСЬКОВІ ДІЇ ЯК ЧИННИК АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ

1.1. Основні джерела викидів шкідливих речовин у повітря під час бойових дій

У сучасних умовах повномасштабного збройного конфлікту Україна зіткнулась не лише з прямими загрозами для безпеки, але й із глибокими екологічними наслідками, які мають як короткостроковий, так і довготривалий характер. Серед компонентів довкілля, що зазнають найбільш інтенсивного антропогенного навантаження, особливе місце посідає атмосферне повітря. Забруднення повітряного середовища під час війни має специфічну природу, відрізняється високою непередбачуваністю, локальними піками та складною хімічною структурою. Джерела таких викидів значною мірою залежать від типу воєнних дій, структури місцевості, цілей обстрілів, наявності промислових об'єктів та супутніх факторів, зокрема погоди, сезонності та напрямку вітру [8, 17].

Один із найпотужніших чинників забруднення – це вибухи боєприпасів, авіабомб, ракет, артилерійських снарядів і мін. Під час детонації таких об'єктів утворюється хмара газів, аерозолів і дрібнодисперсних частинок. У процесі згоряння вибухових речовин, таких як тротил (ТНТ), гексоген, октоген, піроксилін, пікринові з’єднання, утворюються різні газоподібні продукти: оксиди азоту (NO, NO_2), чадний газ (CO), діоксид вуглецю (CO_2), а також водяна пара. Якщо вибух відбувається в населеному пункті або поблизу промислового об'єкта, до складу повітряної суміші додаються пилові частинки металів, залишки будівельних матеріалів, сажисті структури. Частина вибухових речовин не згоряє повністю й може залишатися у вигляді тонкодисперсних частинок у повітрі, що зумовлює підвищену токсичність аерозольної фази [16, 28].

Окрема увага заслуговує наявність у повітрі частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10}, які утворюються внаслідок як детонацій, так і вторинних процесів, пов’язаних із руйнуванням інфраструктури. Відомо, що ці частинки проникають у дихальні шляхи людини, досягають альвеол і можуть викликати запальні процеси, загострення бронхолегеневих захворювань, а при тривалому впливі – навіть онкопатології. Підвищення концентрацій дрібнодисперсного пилу було зафіксовано під час інтенсивних обстрілів енергетичної інфраструктури Київської області у зимовий період, коли додатково до вибухів активізувалося використання дизельних генераторів та альтернативних джерел тепла [3, 9].

Не менш небезпечним джерелом є пожежі, які виникають як прямий наслідок бойових дій. Горять не лише будівлі, а й автомобільна техніка, склади пального, транспортна інфраструктура, лісові масиви, сільськогосподарські угіддя. У результаті спалювання горючих матеріалів до атмосфери потрапляє широкий спектр шкідливих речовин: оксиди вуглецю, метан, леткі органічні сполуки (ЛОС), поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), діоксини, формальдегід, бензол, синильна кислота, фтор- і хлорвмісні сполуки. При згорянні синтетичних матеріалів, таких як пластик, гума, пінополіуретан, утворюються токсичні продукти піролізу, які мають мутагенну й канцерогенну дію [17, 18].

Пожежі на нафтобазах або в місцях зберігання технічних рідин особливо небезпечні. Наприклад, під час горіння дизельного пального або трансформаторного масла можливе вивільнення поліхлорованих біфенілів (ПХБ), які належать до групи стійких органічних забруднювачів (СОЗ). Ці речовини відзначаються високою біоакумулятивністю та тривалим періодом розкладу. Їхній викид у повітря може призводити до довготривалого забруднення не лише повітря, а й ґрунтів та води – через осідання аерозольної фази [16, 27].

Ще одним значущим джерелом є руйнування промислових об'єктів і підприємств, особливо тих, що працювали з хімічними реагентами, металами, енергетичними ресурсами. Відомо, що під час авіаударів по підприємствах

хімічної промисловості можуть вивільнятись аміак, хлор, фосген, сірководень, метанол, нітратні або сульфатні аерозолі. У разі руйнування систем очищення або зберігання відходів – у повітря можуть потрапити вторинні продукти – пил, токсичні гази, мікрочастинки абразивів, цементу, шлаків, золи, що мають високий рівень інгаляційної небезпеки [18, 28].

Окрему загрозу становлять викиди, спричинені використанням дизельних генераторів. У багатьох населених пунктах у періоди блекаутів дизельні установки стали основним джерелом електропостачання, але разом із тим – джерелом токсичних викидів. Горіння дизельного пального супроводжується виділенням сажі, CO, NO_x, вуглеводнів. При цьому слід враховувати, що генератори часто експлуатуються у дворах житлових будинків або біля укриттів, тобто в місцях, де люди перебувають тривалий час. Концентрації шкідливих речовин у таких умовах можуть перевищувати гранично допустимі рівні у кілька разів, особливо за несприятливих метеоумов (інверсія, штиль) [3, 10].

Не можна ігнорувати і такий чинник, як вторинне забруднення повітря. Після вибухів або пожеж частина твердих частинок осідає на поверхнях, але згодом вони можуть підніматися в повітря знову – під час вітру, руху техніки, прибирання. Особливо активно такий пил формується на територіях зі зруйнованими будівлями, на колишніх місцях бойових дій, полігонах знищеної техніки. Пил містить мікроскопічні уламки бетону, цегли, скла, пластика, металу. У його складі можуть бути залишки вибухових речовин, продукти горіння, токсичні метали. Це ускладнює очищення повітряного басейну навіть після зниження бойової активності [27].

Ситуацію погіршує ще й те, що в умовах війни системи централізованого моніторингу часто виведені з ладу, або їхні дані є фрагментарними. У таких умовах джерелом інформації виступають локальні громадські системи, як-от EcoCity, або неурядові екологічні ініціативи. Дані з таких систем свідчать про суттєві локальні коливання рівня забруднення

повітря, що збігаються з моментами обстрілів, пожеж або аварій на інфраструктурі [10, 23].

Усе зазначене свідчить про те, що під час бойових дій формується надзвичайно складний за складом і потужністю комплекс джерел атмосферного забруднення. На відміну від звичайних умов, де джерела здебільшого стаціонарні або рухомі (промисловість, транспорт), у період війни виникають непередбачувані, короткотривалі, але високотоксичні викиди, які важко фіксувати, але які мають серйозні екологічні та медичні наслідки.

Для належної оцінки екологічного навантаження потрібні систематичні спостереження, залучення сучасних сенсорних технологій, дистанційного зондування та математичного моделювання поширення забруднення. Однак навіть без глибокого аналізу зрозуміло, що основними джерелами викидів шкідливих речовин під час бойових дій є: вибухи снарядів, пожежі, руйнування інфраструктури, робота генераторів і вторинне пилове забруднення. Саме вони формують новий тип техногенного навантаження на атмосферне середовище.

1.2. Типові забрудники: характеристика і вплив на здоров’я

Атмосферне повітря є середовищем, з яким людина взаємодіє щосекунди, тому навіть незначні зміни його складу можуть мати серйозні наслідки для здоров’я. У контексті воєнних дій, коли повітря забруднюється не лише звичними викидами (транспорт, промисловість), а й вибухами, пожежами, горінням хімічних речовин, у повітря надходить цілий спектр небезпечних речовин. У цьому підрозділі розглянуто основні з них: дрібнодисперсні частинки, оксиди азоту, чадний газ, сірчистий газ, леткі органічні сполуки, поліциклічні ароматичні вуглеводні та діоксини. Особливу увагу приділено не лише хімічній характеристиці, а й їх впливу на здоров’я людини.

Одним із найпоширеніших і найбільш небезпечних забрудників є дрібнодисперсні тверді частинки $PM_{2.5}$ та PM_{10}**.** Ці частинки мають діаметр до 2,5 мкм і 10 мкм відповідно. Утворюються вони під час згоряння палива, вибухів, механічного руйнування матеріалів [4, 9].

У повітрі зони бойових дій $PM_{2.5}$ фіксуються майже постійно, особливо у періоди обстрілів або пожеж. Основна небезпека цих частинок у їх здатності проникати глибоко в дихальну систему. Частинки $PM_{2.5}$ проникають до альвеол легенів, а частина з них потрапляє навіть у кровоносне русло. Це може спричинити запальні процеси, загострення бронхіальної астми, хронічне обструктивне захворювання легень, а також підвищити ризик інсульту та інфаркту. За оцінками ВООЗ, підвищення середньодобового рівня $PM_{2.5}$ всього на 10 мкг/м³ асоціюється зі зростанням серцево-судинної смертності на 0,3–0,6 % [20, 30].

Не менш важливою є присутність у повітрі оксидів азоту **(**NO та NO_2**).** Вони утворюються при високотемпературному згорянні пального, що характерне для вибухів, роботи двигунів техніки, генераторів. NO_2 має різко подразливу дію, впливає на слизову оболонку дихальних шляхів, викликає бронхоспазм, посилює симптоми алергій. При тривалому впливі – сприяє розвитку хронічного бронхіту. У дітей та підлітків тривале перебування в атмосфері з високим вмістом NO_2 асоціюється з підвищеним ризиком зниження функції легень. Окрім цього, оксиди азоту беруть участь у фотохімічних реакціях з утворенням озону на рівні тропосфери – що, своєю чергою, посилює негативний ефект [20, 21].

Чадний газ **(**CO**)** – безбарвний, без запаху, але надзвичайно небезпечний для людини. Утворюється при неповному згорянні органічних речовин, особливо у закритих або погано вентильованих просторах. В умовах воєнного часу це типово для укриттів, підвалів, де працюють дизельні генератори. CO легко зв’язується з гемоглобіном, утворюючи карбоксигемоглобін, що блокує транспортування кисню. Перші симптоми отруєння – головний біль, запаморочення, нудота, у тяжких випадках – втрата свідомості, порушення

серцевого ритму та смерть. Особливо вразливі – діти, вагітні жінки, люди з хворобами серця [4, 20].

Іншим небезпечним газом є діоксид сірки **(**SO_2**),** який утворюється при згорянні сірковмісного пального, а також при руйнуванні деяких хімічних об'єктів або складів з добривами. SO_2 легко розчиняється у воді, утворюючи сірчисту кислоту. Саме тому його викиди можуть викликати кислотні дощі, які мають шкідливий вплив не тільки на людину, а й на рослини, ґрунти, будівлі. Зі здоров'ям людини високі концентрації SO_2 пов'язані з подразненням очей, кашлем, стисканням у грудях, зменшенням об'єму вдиху. В осіб із бронхіальною астмою навіть незначне підвищення SO_2 може викликати загострення [20, 24].

Дуже небезпечним класом речовин, що часто з'являються в зоні вибухів, є леткі органічні сполуки (ЛОС)**.** До них належать бензол, толуол, ксилол, формальдегід, ацетон, акролеїн. Ці речовини легко випаровуються при кімнатній температурі і дуже швидко накопичуються у повітрі, особливо в умовах слабкої вентиляції. ЛОС мають подразнюючий вплив на слизові оболонки очей, носа, горла, сприяють розвитку головного болю, зниженню концентрації уваги, втомі. Деякі з них (наприклад, бензол і формальдегід) є підтвердженими канцерогенами. Особливо небезпечними вони є при довготривалому впливі або у разі одночасного надходження з іншими токсикантами [4, 21].

Окрему категорію становлять поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) – органічні сполуки, що утворюються під час неповного згоряння вуглецевмісних речовин: пального, пластмас, гуми. Найвідомішим серед них є бензапірен. Ці речовини характерні для диму, золи, пилу після пожеж, згоряння техніки, будівельних матеріалів. Більшість ПАВ є канцерогенними або мутагенними, можуть викликати ушкодження ДНК, а також сприяти виникненню злоякісних пухлин органів дихання, травлення, сечостатевої системи. Частинки ПАВ адсорбуються на $PM_{2.5}$, що збільшує їхню

біодоступність. Саме тому вони є надзвичайно небезпечними при вдиханні [4, 25].

Ще один особливо токсичний клас речовин – це діоксини**.** Ці сполуки не мають кольору та запаху, але є одними з найнебезпечніших токсикантів. Утворюються вони при згорянні хлоровмісних речовин, пластику, при термічному руйнуванні технічних масел, фарб, електричного обладнання. Найвідомішим є 2,3,7,8-тетрахлородибензо-пара-діоксин (TCDD), який належить до першого класу небезпеки. В організмі діоксини накопичуються у жировій тканині, мають довгий період напіврозпаду (до 10 років), впливають на імунну, ендокринну, репродуктивну систему, сприяють онкозахворюванням. Навіть малі дози при тривалому впливі можуть мати серйозні наслідки [16, 17].

Не варто ігнорувати й метали та металоїди, які вивільняються в атмосферу при вибухах або спалюванні техніки та будівельних конструкцій. Зокрема, це свинець, кадмій, миш'як, ртуть, хром, мідь. Частина з них має нейротоксичну дію (свинець, ртуть), інші викликають нефротоксичність або кардіотоксичність. Наприклад, ртуть може накопичуватися в головному мозку, спричиняючи розлади пам'яті, координації, настрою. Кадмій уражає нирки, кісткову тканину. Речовини цього типу можуть надходити в організм як через вдихання, так і через шкіру чи їжу – після осідання пилу на поверхнях [19, 25].

Під час бойових дій у повітря потрапляє також озон (O_3)**,** який утворюється в нижніх шарах атмосфери внаслідок фотохімічних реакцій за участі оксидів азоту та летких органічних речовин. Озон має сильні окислювальні властивості і при вдиханні подразнює дихальні шляхи, викликає кашель, стискання в грудях, головний біль. На відміну від стратосферного озону, який захищає нас від УФ-випромінювання, тропосферний озон є шкідливим і небажаним для здоров'я [20, 21].

Важливо зазначити, що під час війни всі ці речовини найчастіше присутні не поодинці, а у вигляді сумішей**.** Саме така комбінація має

найбільшу біологічну активність, адже забрудники можуть посилювати дію одне одного (так званий ефект синергії). Наприклад, одночасна дія $PM_{2.5}$ та діоксинів значно збільшує канцерогенний ризик порівняно з впливом кожного з них окремо. Така ситуація особливо небезпечна для людей із хронічними хворобами, дітей, літніх осіб, вагітних жінок [26, 30].

Усі вищезазначені речовини мають різні шляхи надходження в організм, але найбільш типовим є інгаляційний шлях**.** Це означає, що забруднене повітря одразу потрапляє в органи дихання, і далі – в усі системи організму. При цьому очищення повітря в умовах війни ускладнене: не всі мають доступ до фільтрів, укриття часто не вентилюються, а частина джерел забруднення взагалі не фіксується стандартними засобами.

Таким чином, повітря в зоні бойових дій може містити широкий спектр шкідливих домішок, кожна з яких становить небезпеку для здоров’я людини. Їхня сукупна дія часто перевищує вплив у мирний час у десятки разів, що вимагає не тільки належного моніторингу, а й профілактичних заходів – інформування населення, використання індивідуального захисту, регулювання режиму перебування на відкритому повітрі тощо. Сучасна війна – це не лише загроза тілесних ушкоджень, а й повільна невидима атака на організм через повітря, яким ми дихаємо**.** І тому розуміння хімічного складу цього повітря – питання не лише екологічної науки, а й національного здоров’я.

1.3. Світовий і вітчизняний досвід досліджень воєнного впливу на атмосферу

Дослідження впливу воєн на якість повітря активно розвинулися в останнє десятиліття, завдяки новим технологіям – супутниковому моніторингу і громадським мережам сенсорів. Зокрема важливими стали спостереження в Україні після початку широкомасштабної війни 2022 року, що дало змогу фіксувати пік забруднення навіть в умовах активного конфлікту [1, 23].

В одному з досліджень порівнювались супутникові дані NO_2, CO, O_3, SO_2, $PM_{2.5}$ та наземні дані моніторингу Києва у перші місяці війни. Дослідники виявили чітку кореляцію між активністю бойових дій і рівнями забруднення: NO_2 та $PM_{2.5}$ особливо реагували на обстріли та руйнування, CO і O_3 зросли, а SO_2 навпаки різко зменшився внаслідок зупинки промисловості [1].

У 2022–2023 роках платформа EcoCity стала одним з основних джерел даних у тилових регіонах. У повідомленнях МОЗ і національних ЗМІ фіксувалися значні перевищення $PM_{2.5}$ і CO після вибухів або пожеж у багатьох областях. Наприклад, після пожеж 2023 року AQI досягав рівня «незадовільно» і громадські активісти радили залишатися вдома [10].

Аналогічні підходи застосовувалися у Іраку (1991 і 2003 роки) та Сирії, де супутникові дані MODIS і OMI фіксували зростання $PM_{2.5}$ у 5–10 разів після спалювання нафтових об’єктів. У В’єтнамі й Боснії–Герцеговині дослідники вже в 1990-х використали супутникову і наземну базу для розуміння масштабів пилових та металевих викидів [8, 24] .

Дослідження показують, що після критичних обстрілів концентрація $PM_{2.5}$ могла перевищувати 150–200 $\mu g/m^3$, тобто рівень, що у 6–8 разів перевищував рекомендовані нормативи. Крім того, показники CO зростали на 10 % внаслідок пожеж у прилеглих екосистемах [1, 16].

Досвід показує, що ефективна оцінка воєнного впливу на атмосферу потребує інтеграції:

- Супутникових вимірювань (NO_2, $PM_{2.5}$, CO, O_3),
- Наземних станцій (державних, громадських),
- Мобільних сенсорів (дрони, пересувні лабораторії),

В Україні цей підхід вже формуєтьс, в тому числі завдяки системі громадського моніторингу повітря EcoCity, яка є відкритою [10, 12].

Ключові недоліки і шляхи вдосконалення:

- Недостатність наземного покриття, тобто багато сіл і невеликих міст не мають сенсорів EcoCity, що залишає «сліпі» зони.

- Час відгуку супутникових систем. Це означає, що вони менш придатні для фіксації коротких викидів.
- Професійна обробка даних**.** Для неї потрібна додаткова координація між екологами, медиками і метеорологами.

Отже, світовий досвід довів, що багатоетапний моніторинг дає реальні дані, необхідні не лише для оцінки екологічного стану, а й для прийняття рішень: від евакуації до післявоєнної відбудови. Україна активно інтегрує ці підходи. Набутий досвід переконує, що моніторинг якості повітря має стати системною складовою екологічної політики під час й після воєнних дій [12, 21].

1.4. Нормативно-правові засади регулювання якості повітря в Україні

Якість атмосферного повітря є одним із ключових чинників, що визначають стан довкілля та здоров’я населення. З огляду на це, в Україні сформовано нормативно-правову базу, що регулює питання охорони повітряного середовища, визначає вимоги до викидів забруднюючих речовин, встановлює стандарти якості та передбачає механізми контролю. У зв’язку з активізацією бойових дій на території держави, зростає потреба у вдосконаленні системи правового регулювання, адаптації національних норм до умов воєнного часу та запровадженні інноваційних механізмів реагування на надзвичайні екологічні ситуації.

Основу правового регулювання у сфері охорони повітряного середовища в Україні становлять Конституція України, Закони України «Про охорону навколишнього природного середовища» та «Про охорону атмосферного повітря», а також підзаконні нормативно-правові акти, санітарні регламенти, методики та державні стандарти. Зокрема, стаття 50 Конституції гарантує кожному право на безпечне для життя і здоров’я довкілля, а також на відшкодування завданої порушенням цього права шкоди. Відповідно до

частини 4 статті 13, атмосферне повітря належить народу України як об'єкт права власності, що підлягає охороні державою.

Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» (№ 1264-XII від 25 червня 1991 року) закріплено основні засади екологічної політики, зокрема принцип пріоритетності збереження екосистем, збалансованості використання природних ресурсів, екологічної безпеки населення та відповідальності за порушення законодавства. Конкретні правові норми, що регламентують діяльність у сфері охорони повітря, зосереджено в Законі України «Про охорону атмосферного повітря» (№ 2707-XII від 16 жовтня 1992 року, в редакції 2024 року). Цей документ визначає правові та організаційні основи охорони атмосферного повітря, встановлює правила регулювання викидів забруднюючих речовин від стаціонарних і пересувних джерел, а також передбачає обов’язковість екологічного моніторингу [13, 14].

Важливою складовою законодавчого регулювання є встановлення нормативів якості повітря. В Україні діють граничнодопустимі концентрації (ГДК) забруднюючих речовин у повітрі населених пунктів, що затверджуються санітарними нормами. Наприклад, згідно з ДСП 173-96 «Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць», встановлено нормативи на концентрації таких речовин, як формальдегід, діоксид азоту, бензол, фенол, сірководень, а також завислі речовини (пил PM_{10}, $PM_{2.5}$). Для кожного з них передбачено як середньодобові, так і максимальні разові концентрації, що мають бути враховані при оцінці екологічної ситуації [15].

Окрім нормативів якості, важливим інструментом контролю є нормативи граничнодопустимих викидів (ГДВ) для стаціонарних джерел, що визначаються для кожного підприємства окремо з урахуванням технологічних особливостей та місцевих умов. Встановлення ГДВ є обов’язковою умовою отримання дозволу на викиди, який видається центральним органом виконавчої влади у сфері охорони довкілля. Видача дозволів передбачає проведення екологічної експертизи, розроблення індивідуальних розрахунків

викидів, а також узгодження з органами місцевого самоврядування. У випадку перевищення нормативів передбачено штрафні санкції, припинення діяльності та обов'язкове впровадження систем очищення повітря [6, 14].

Питання моніторингу якості повітря регламентуються постановою Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 року № 827 «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу у сфері охорони атмосферного повітря». Документ передбачає створення мережі постів спостереження, які мають бути обладнані автоматизованими засобами вимірювання, а також функціонування електронної системи збирання, обробки та оприлюднення даних. Указаним Порядком передбачено поділ моніторингу на державний, регіональний та локальний рівні, що дозволяє враховувати особливості територій і оперативно реагувати на забруднення [2, 12].

У процесі адаптації до стандартів ЄС, Україна здійснює гармонізацію законодавства з Директивою 2008/50/ЄС «Про якість атмосферного повітря і чистіше повітря для Європи». У межах цієї гармонізації планується запровадження цільових показників для нових забруднювачів (наприклад, мікрочастинки $PM_{2.5}$), перегляд існуючих нормативів відповідно до рекомендацій ВООЗ, розширення моніторингової мережі, а також створення інтегрованої системи оцінки ризиків для здоров'я [5, 7, 11].

Окрему увагу слід приділити правовим механізмам регулювання у період воєнного стану. В умовах збройного конфлікту дозвільні процедури можуть бути спрощені або змінені в частині пріоритетності безпеки громадян. Постанова КМУ від 20 січня 2023 року № 58 передбачає особливий режим поводження з об'єктами підвищеної екологічної небезпеки, а також дозволяє проводити оперативні втручання в системи моніторингу у випадку надзвичайних ситуацій. Разом із цим залишаються актуальними вимоги щодо інформування населення про стан повітря, особливо в разі фіксації перевищення допустимих рівнів забруднення [14, 15].

Станом на 2025 рік, актуальним викликом для нормативної системи є інтеграція громадських систем моніторингу, таких як EcoCity, до офіційної

структури екологічного контролю. Відсутність єдиного центру збору та верифікації даних з різних джерел ускладнює аналіз та планування заходів реагування. У цьому контексті потребує перегляду правовий статус громадських екологічних ініціатив, а також методики обробки отриманих ними даних [10, 12].

Підсумовуючи викладене, слід зазначити, що нормативно-правові засади регулювання якості повітря в Україні базуються на комплексному підході до охорони атмосферного середовища, який включає законодавчі вимоги, санітарно-гігієнічні нормативи, дозвільну систему, механізми контролю та моніторингу. Однак сучасні виклики, пов’язані з воєнними діями, потребують оновлення чинних норм, посилення спроможностей місцевих громад до самостійного моніторингу, інтеграції громадських даних та імплементації сучасних міжнародних стандартів.

1.5. Роль цифрових екологічних платформ у воєнний час

Початок широкомасштабної війни в Україні спричинив не лише серйозні гуманітарні виклики, а й різке погіршення стану довкілля, зокрема якості атмосферного повітря. Втрата контролю над офіційними екологічними системами вимірювання, пошкодження державних постів моніторингу та зростання концентрацій шкідливих речовин створили умови, за яких цифрові екологічні платформи стали не просто корисними, а життєво необхідними для оперативного реагування.

Цифрові екологічні платформи, серед яких EcoCity**,** SaveEcoBot та інші громадські системи, забезпечують доступ до відкритих даних моніторингу якості повітря в режимі реального часу і в доступному для кожного форматі. Вони використовують мережу сенсорів, часто встановлених волонтерами або місцевими громадами, для фіксації концентрацій таких індикаторів, як $PM_{2.5}$, NO_2, CO. За допомогою мобільних застосунків та Telegram-ботів вони надсилають сповіщення про перевищення [10, 23]..

Основною перевагою цих платформ є оперативність та відкритість даних. В умовах, коли державні станції часто були пошкоджені або відключені через бойові дії, цифрові мережі заповнили інформаційний вакуум. Завдяки інтеграції мобільної картографії, повідомлень про якість повітря та геолокації платформи стали корисними для звичайних громадян. Коли після вибухів у промислових зонах повітря став непридатним, платформи автоматично надсилали попередження уразливим групам, що дало змогу вчасно прийняти міри по захисту свого здоров'я.

Крім того, відкриття даних підсилює роль громадської участі: користувачі можуть не лише спостерігати за якістю повітря, але й ставити сенсори, порівнювати показники, аналізувати їх у контексті бойових подій. Декілька дослідницьких проектів використали цифрові дані громадських мереж у поєднанні з супутниковими даними для оцінки короткочасних викидів під час вибухів, підтвердивши високі концентрації токсичних газів у зонах, де традиційний моніторинг недоступний [1, 10].

Платформа EcoCity зробила особливий акцент на своїй системі, яка класифікує якість повітря від «доброї» до «надзвичайно поганої» і містить конкретні поради для уразливих груп – дітей, хворих на астму, літніх – що особливо актуально під час воєнних дій. Ці системи стали інструментами доступності екологічної інформації: тепер кожен може долучитися до моніторингу і перевірити як змінюється якість повітря під час обстрілів, пожеж чи руйнувань [10].

Український підхід є унікальним тим, що ми поєднали супутники з локальною громадською мережею. Дані та аналітика EcoCity використовуються разом із супутниковими показниками для моделювання розповсюдження токсичних аерозолів, пікових викидів після авіаударів та руйнування промислових об'єктів. Поєднання платформ дозволило отримати інформацію про перевищення $PM_{2.5}$ навіть у селах, де не встановлено офіційних приладів [1, 10].

Значні результати цифровий екологічний моніторинг дав у питаннях інформування та формування екологічної політики.

Незважаючи на всі переваги, цифрові платформи стикаються з низкою викликів. Технічні складності включають необхідність калібрування сенсорів, адаптацію до екстремальних умов (пила, дим, руйнування), захист від цифрових атак. Громадські сенсори не завжди відповідають стандартам точності. Інтернет-покриття у зонах бойових дій нестабільне, що позначається на доступності даних.

Правовий вакуум також викликає сумніви. Роль цифрових платформ у системі екологічного моніторингу офіційно не закріплена: дані не можуть бути прямо використані для позовів до суду або як підстава обмежувальних заходів. Водночас, відсутність альтернативи робить їх єдиним джерелом, і тому необхідне розширення нормативної бази, яка б формально визнавала їх дані [2, 12].

Найбільш ефективною стратегією залишається створення гібридної системи моніторингу, що поєднує офіційні державні постійні станції, супутникові дані й локальні громадські мережі. Такий підхід уже має позитивні приклади [21].

Отже, цифрові екологічні платформи в умовах війни виконують роль мультиканального моніторингу, інструментів інформаційної безпеки населення, інструментів громадянського контролю та локального екологічного врядування. Вони заповнюють прогалини державної системи, дозволяють точно і швидко фіксувати шкоду, яка без їхньої участі залишалася б невидимою. Проте без законодавчої підтримки, стандартизації сенсорного обладнання та підвищення цифрової культури це лише тимчасовий захід, що потребує розвитку в поствоєнний період.

У перспективі саме цифрові платформи повинні стати офіційною підґрунттям для оперативного реагування на надзвичайні екологічні ситуації. Для цього слід інтегрувати їх у систему державного моніторингу, встановити стандарти якості, забезпечити відкритість і верифікацію даних. Це зробить

екологічний контроль більш децентралізованим, оперативним і прозорим. Роль цифрових екологічних платформ сьогодні – це не просто технологія, це інструмент виживання та основа стратегічної безпеки в епоху екологічно агресивного конфлікту.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УМОВАХ ВІЙНИ

2.1. Загальна характеристика досліджуваних регіонів (Київської і Полтавської областей)

У межах цього дослідження для аналізу впливу бойових дій на якість атмосферного повітря було обрано два адміністративні регіони України: Київську та Полтавську області. Обидва регіони розташовані в центральній частині країни, мають подібні природно-кліматичні умови, розвинену інфраструктуру та активну присутність сенсорів громадського моніторингу якості повітря. Водночас між ними є суттєві відмінності у рівні інтенсивності бойових дій, що дає можливість провести обґрунтоване порівняння регіонального впливу війни на стан атмосферного повітря.

Київська область належить до регіонів, які безпосередньо постраждали внаслідок активної фази бойових дій у 2022 році. У перші тижні повномасштабного вторгнення значна частина області, особливо північні, північно-західні та північно-східні райони, опинилися в зоні обстрілів, бомбардувань, пожеж, руйнування інфраструктури. Значну шкоду було завдано системам життєзабезпечення, промисловим підприємствам, електромережам. У подальші періоди область регулярно зазнавала ракетних атак, що супроводжувалися вторинними пожежами, забрудненням повітря від згоряння матеріалів та аваріями на об'єктах енергетики [3, 16].

Полтавська область, яка межує з Київською, не перебувала у зоні активного зіткнення, однак систематично зазнавала повітряних тривог, точкових ракетних ударів по об’єктах критичної інфраструктури та логістичних центрах. Її особливістю є транзитний характер: через область проходять основні транспортні магістралі. Це призвело до збільшення інтенсивності транспорту, зростання викидів від дизельних генераторів, тимчасових котелень, посиленого навантаження на промислові об’єкти й логістичні вузли [18].

Вибір саме цих двох областей зумовлений необхідністю порівняти ситуацію в регіоні, який зазнав інтенсивного бойового навантаження (Київська область), із регіоном, де бойові дії не були масштабними, але війна опосередковано вплинула через зміну структури споживання енергії, мобільність населення, навантаження на інфраструктуру (Полтавська область). Обидві області є достатньо репрезентативними для оцінки різних сценаріїв забруднення повітря в умовах війни, як прямого (внаслідок вибухів, пожеж, руйнувань), так і непрямого (внаслідок зростання споживання палива, зміни логістичних маршрутів, переміщення населення).

Обидві області розташовані в межах лісостепової зони України з помірно континентальним кліматом, однак між ними простежуються відмінності, що мають значення в екологічному аналізі.

Київська область характеризується дещо прохолоднішим і вологішим кліматом, що зумовлено як географічним розташуванням, так і наявністю великих водних об’єктів, зокрема річки Дніпро, водосховищ та болотистих територій. Середньорічна кількість опадів на Київщині становить 600–650 мм, а середньорічна температура повітря – близько +7,5 °C. Рельєф переважно хвилястий, з наявністю численних річкових долин, яружно-балкових систем і лісових масивів. Це сприяє частішому перемішуванню повітряних мас і частковому поглинанню пилу та шкідливих речовин рослинністю.

На відміну від Київщини, Полтавська область має більш відкритий рівнинний рельєф, меншу залісненість (приблизно 11–12 % площі) і більшу площу сільськогосподарських угідь. Клімат тут дещо тепліший і сухіший: середньорічна температура повітря становить близько +8–8,5 °C, а кількість опадів – у межах 500–550 мм. У весняно-літній період значна площа відкритого ґрунту, особливо чорнозему, є джерелом пилу, який разом із викидами від транспорту і господарської діяльності формує специфічний пилогазовий фон. В умовах зменшеної лісистості затримка та фільтрація дрібнодисперсних частинок у приземному шарі повітря ускладнена.

Таким чином, Київська область загалом має більш сприятливі природні умови для розсіювання та локального очищення повітря, у той час як Полтавська більш вразлива до накопичення пилу й вторинного забруднення в умовах тривалого безвітря. Ці відмінності необхідно враховувати при аналізі даних моніторингу, особливо в контексті оцінки фонових і пікових концентрацій забруднюючих речовин. Вони також частково пояснюють регіональні контрасти у виявлених рівнях PM2.5, оксидів азоту та озону, які фіксуються під час активного використання цифрових платформ громадського моніторингу.

Обидві області мають розвинену систему стаціонарних та громадських постів моніторингу якості повітря. Зокрема, за даними EcoCity на 2024 рік, у Київській області працює понад 50 сенсорів $PM_{2.5}$ та PM_{10}, тоді як у Полтавській – понад 20. Це дозволяє не лише порівняти середньодобові та пікові концентрації частинок, а й відстежити просторово-часові тренди забруднення. Варто також зазначити, що у Київській області частіше фіксуються екстремальні значення $PM_{2.5}$, які суттєво перевищують рекомендації ВООЗ (10–15 мкг/м³), особливо у періоди після масованих ракетних атак [3, 10, 20].

Ще одним фактором, який обґрунтовує вибір саме цих двох областей, є наявність достовірних супутникових даних. Аналіз даних за 2022–2024 роки свідчить про стабільно вищі середньомісячні концентрації оксидів азоту в Київській області у порівнянні з Полтавською, особливо у зимові періоди, коли зростає використання автономного опалення [1, 3].

Важливо також ураховувати демографічні й соціальні відмінності між регіонами. Київська область має вищу щільність населення, більший рівень урбанізації, вищий попит на енергоспоживання, тоді як Полтавська більш аграрна, з меншою концентрацією промислових об’єктів. Проте під час війни ці характеристики частково змінювались: у Київській області спостерігалося тимчасове зменшення населення через евакуацію, натомість Полтавська стала одним із хабів розміщення внутрішньо переміщених осіб. Це створило

додаткове навантаження на локальні системи теплопостачання, транспорту й поводження з відходами.

Підсумовуючи, Київська і Полтавська області є оптимальними для порівняльного аналізу, оскільки поєднують географічну близькість, спільні кліматичні умови та відмінності в характері впливу війни. Таке дослідження дозволяє виявити не лише прямі наслідки бойових дій для якості повітря, а й приховані ефекти – ті, що пов'язані зі змінами у поведінці населення, структурі енергоспоживання, логістиці та локальній екологічній політиці.

2.2. Обґрунтування вибору індикаторів ($PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, CO, SO_2 тощо)

Вибір індикаторів для оцінки якості атмосферного повітря у воєнний час повинен ґрунтуватися на кількох принципах. Перший – чутливість до джерел, характерних для військових дій, таких як вибухи, пожежі, робота техніки, руйнування інфраструктури. Другий – доказовість українськими та міжнародними нормативами щодо екологічних та медичних ризиків. Третій – можливість вимірювання за допомогою цифрових платформ і супутникового моніторингу, що додає оперативності та порівняльності результатів.

До основних індикаторів увійшли дрібнодисперсні частки $PM_{2.5}$ і PM_{10}**,** оксиди азоту NO_2**,** чадний газ CO **та** діоксид сірки SO_2**,** що обґрунтовано їхньою роллю як маркерів якості повітря у кризових умовах.

Вибір $PM_{2.5}$ та PM_{10} виправданий їхньою здатністю відображати механічне та хімічне забруднення, типове для зон бойових дій. PM_{10} охоплює більші фракції пилу, які часто надходять внаслідок руйнування будівель, пересування важкої техніки, спалювання рослинності. $PM_{2.5}$, навпаки, відображає більш тонкі частини, що проникають глибоко в легені й кров, здатні містити токсичні продукти детонації вибухових речовин або горіння синтетики. За даними ВООЗ, саме $PM_{2.5}$ належать до найнебезпечніших забрудників зовнішнього середовища, що актуалізує їхнє використання для воєнного моніторингу [9, 20].

У доповнення до фракцій пилу було обрано оксиди азоту (NO та NO_2). У військових умовах отримання великих кількостей NO_2 пов'язане з високотемпературним горінням вогнів, вибухів, роботи дизельних двигунів. NO_2 є потужним подразником респіраторної системи, сприяє формуванню тропосферного озону у присутності ЛОС та сонячного світла і має доведений зв'язок зі зростанням кількості госпіталізацій з астмою [20, 22].

Чадний газ CO дуже часто присутній у місцях вибухів, пожеж, роботи генераторів у непровітрюваних чи погано вентильованих приміщеннях. Цей газ характеризується дуже високою токсичністю навіть у відносно низьких концентраціях, впливаючи на серцево-судинну систему, рівень кисню в тканинах, зміни когнітивних функцій. Ураження CO стають особливо небезпечними для людей, що опинились в зонах воєнних руйнувань або тривалого перебування в підвалах, де застосовуються переносні агрегати [4, 20].

Ще одним важливим індикатором є діоксид сірки SO_2, присутній у викидах від спалювання сірковмісного палива, деталей транспортної інфраструктури, а також можливих хімічних складових боєприпасів або будівельної ізоляції. SO_2 є відомим подразником допоміжно дихальної системи, часто взаємодіє з водяною парою, утворюючи кислотні аерозолі, що можуть завдавати шкоди як людині, так і зеленим насадженням, будівельному матеріалу [20, 24].

Доповнюючи перелік індикаторів можна вважати доцільним включення формальдегіду, бензолів, ЛОС, ПАВ, але їх вимірювання в польових умовах є менш практичним порівняно з PM, NO_2, CO, SO_2. Тому само обмеження до основного набору забезпечує надійність, оперативність і стабільну порівнянність даних із інших джерел.

Функція кожного індикатора у механіці війни різна. PM_{10} допомагає зафіксувати руйнування інфраструктури та вибухові руйнування, $PM_{2.5}$ – піки токсичності вибухових матеріалів та горіння будівель. NO_2 віддзеркалює інтенсивність двигунів, вибухів, пожеж та фотохімічну реактивність. CO –

індикатор чадної обстановки в укриттях і робочих середовищах. SO_2 – попереджувальний сигнал появи хімічних компонентів при горінні технічних матеріалів або загорянні інфраструктурних об’єктів.

Для забезпечення коректності оцінки використовуються кілька джерел вимірів. По-перше, дані цифрових платформ громадського моніторингу EcoCity, SaveEcoBot дозволяють оперативно фіксувати локальні зміни. По-друге, дані офіційних державних постів, наявність яких у зоні бойових дій обмежена, але дозволяє отримати верифікацію. По-третє, супутникові системи надають щоденні або декількаразові дані про атмосферні ввідні індикатори (NO_2, CO, HCHO), що дозволяє синхронізувати польові дані із широкомасштабною картиною [1, 10, 23].

За допомогою цих індикаторів можна виявити часові, сезонні та екстремальні особливості забруднення. В умовах бойових дій можливі різкі піки NO_2 або $PM_{2.5}$ і CO на кілька порядків протягом короткого часу (година-доба), що потребує гнучкої сигналізації й моделювання поширення. Інтеграція площинних спостережень з супутниками дозволяє врахувати не лише висоту, а й об’єми, що важливо при формуванні екологічних карт та оцінці зон впливу.

Важливим аспектом є і те, що ці індикатори вже використовуються у вітчизняному законодавстві та є передбачені нормативами якості повітря. Зокрема, $PM_{2.5}$ та PM_{10} згадані у санітарних нормах ДСН 173-96, оксиди азоту у відповідних ДСТУ та євроіндексах, CO і SO_2 - у ГДК. Це забезпечує можливість підтвердження небезпечних рівнів забруднення з точки зору законодавства та охорони здоров’я [7, 15].

Серед додаткових переваг саме такого набору індикаторів – можливість побудови екологічного індексу, який враховує кілька показників одночасно. Наприклад, індекс якості повітря (AQI), який застосовує EcoCity, включає $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, CO, SO_2, O_3. Цей індекс дозволяє оцінювати якість у реальному часі за принципом «добре/помірно/шкідливо/дуже шкідливо/надзвичайно шкідливо», що має важливе значення при інформуванні населення і прийнятті рішень [10].

Вибір цих індикаторів також дозволяє адаптувати результати дослідження для подальшого порівняння з міжнародними стандартами. Наприклад, порівняння середньорічних чи пікових концентрацій $PM_{2.5}$ можна безпосередньо співвіднести із гранично допустимими значеннями, встановленими ВООЗ, що сприяє якісному аналізу ризику та надання рекомендацій науково обґрунтованого характеру [20, 22].

Можливості використання цих індикаторів не обмежуються лише оцінкою поточної якості повітря. На основі даних PM_x, NO_2, CO, SO_2 розробляються математичні моделі поширення забрудників, оцінка зон впливу та довгострокові прогнози. У воєнному контексті це дозволяє оцінити, як далеко поширюються токсичні хмари від вибухів або пожеж, яка тривалість підвищеного ризику, які можуть бути наслідки для населення, сільського господарства, водних ресурсів.

Загалом, вибір $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, CO, SO_2 як основних індикаторів обґрунтований їхньою технологічною вимірною досяжністю, високою чутливістю до змін у умовах бойових дій, нормативною вагою та безпосереднім медико-екологічним зв’язком із здоров’ям населення. П'ять цих показників дозволяють створити повну, надійну і оперативну систему оцінки якості повітря в умовах екстремальних екологічних навантажень, що й відповідає головній меті дослідження – визначенню реальних ризиків для довкілля та суспільства під час війни.

2.3. Інструменти збору даних, огляд функціоналу платформи EcoCity

Платформа EcoCity являє собою найбільшу в Україні мережу громадського моніторингу якості повітря. Станом на початок 2025 року вона об’єднує понад 600 сенсорів по країні, з яких приблизно 200 продовжують стабільно працювати навіть у зонах бойових дій. Розроблена як ініціатива ГО «Free Arduino» та підтримана проектом Clean Air for Ukraine (Arnika, Чехія),

EcoCity забезпечує збір, обробку та видачу даних у режимі реального часу [10, 16].

Головний сенсорний модуль платформи, станція серії Sapphire (Sapphire-32, оновлено до Sapphire-64), яка включає датчики $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, CO, O_3, SO_2, формальдегіду, аміаку, а також сенсори для моніторингу радіаційного фону. Розробники повідомляють, що станції вимірюють до 18 показників забруднення і передають вимірювання щохвилини. Ця функція дозволяє аналізувати пікові викиди, пов'язані з вибухами чи пожежами [10].

Базовий функціонал платформи включає інтерактивну карту, де можна побачити стан повітря у режимі реального часу з геоприв'язкою до точок розміщення станцій. Інтерфейс дозволяє фільтрувати дані по регіонах і за часовим періодом, переглядати історію показників, порівнювати таблиці і графіки. Використовується AQI-індекс, який класифікує повітря у шкалу стану повітря від категорії «добрий» до «надзвичайно шкідливий» і включає поради для різних категорій населення.

Інструментарій платформи передбачає автоматичне оповіщення у вигляді push-повідомлень через мобільний додаток та Telegram-бот у разі перевищення граничних значень $PM_{2.5}$, NO_2, CO, SO_2. Це особливо важливо під час локалізованих подій: пожеж, вибухів, переміщень важкої техніки.

Для прикладу ефективності збору даних платформою EcoCity, нижче наведено середньодобові концентрації $PM_{2.5}$ у Київській та Полтавській областях протягом квітня 2025 року.



Рис. 1 – Динаміка дрібнобисперсного пилу у повітрі областей протягом квітня 2025 р.

Як видно з рисунка, концентрації $PM_{2.5}$ у Київській області були стабільно вищими, ніж у Полтавській. Більшість днів квітня у Київській області фіксувалося перевищення рекомендованої межі ВООЗ (15 мкг/м³), особливо в середині місяця. У Полтавській області концентрації залишалися в межах допустимого рівня, за винятком кількох днів із підвищенням. Ця інформація підтверджує ефективність EcoCity у виявленні короткочасних пікових забруднень, які часто пов’язані з військовою активністю, пожежами або транзитними перевезеннями [10, 20].

Крім графічних візуалізацій, EcoCity також дозволяє експортувати дані у форматі CSV для подальшого аналізу у статистичних пакетах або GIS-середовищі. Це важливо для створення просторових моделей забруднення, прогнозування наслідків та планування заходів реагування. Платформа підтримує інтеграцію з іншими екологічними сервісами.

В умовах воєнного часу EcoCity продемонструвала свою унікальну цінність, коли частина державних мереж не функціонувала через ризики або пошкодження, громадські сенсори продовжували передавати дані. Це дозволило оперативно оцінювати екологічну ситуацію в реальному часі та приймати обґрунтовані рішення щодо безпеки цивільного населення.

Загалом, функціонал EcoCity охоплює всі ключові завдання цифрової екологічної платформи: оперативне оповіщення, візуалізацію, аналітику, доступ до історичних даних і включення громадськості в екологічний моніторинг. Такий підхід дозволяє ефективно застосовувати платформу в наукових дослідженнях, включаючи аналіз екологічних наслідків воєнних дій.

Експертна підтримка користувачів забезпечується командою EcoCity і реалізується через консультації, онлайн-інструкції, швидку заміну елементів. Ця функція є ключовою для підтримки якості даних, оскільки сенсори можуть деградувати або виходити з ладу – апарат має бути у робочому стані, щоб мережа не втрачала показники.

Для аналітики доступні хмарні сервіси зі зручним інтерфейсом: користувачі можуть створювати часові ряди за будь-який період, експорт даних у CSV, аналізувати піки, порівнювати різні показники та визначати співвідношення між ними. Додатково платформа підтримує інтеграцію зі сторонніми API для верифікації.

Платформа має також систему взаємодії з громадою та навчання: через EcoQuiz, конкурси, вебінари, кампанії з встановлення станцій. Це формує інституційну спільноту волонтерів, які підтримують експлуатаційну готовність і якість даних . Завдяки цій моделі самопідтримуються локальні ланки і увага до аналітики залишається високою.

Наразі EcoCity продовжує вдосконалення, впроваджуються нові алгоритми коригування даних з урахуванням температури, вологості; тестуються точніші датчики CO_2, озону, формальдегіду; розробляється чутливість до вторинних аерозолів при низьких концентраціях.

Таким чином, функціонал EcoCity дає змогу вирішити ключові завдання: оперативність (мережа щохвилинного збору даних), надійність (технічний супровід і кадрова підтримка), інформування (AQI, Telegram), аналітика, верифікація та розвиток (громадська участь, навчання, модернізація обладнання).

Підсумовуючи, можна узагальнити, що EcoCity - це сучасна цифрова екологічна платформа, яка демонструє як у воєнний час може працювати адаптоване екологічне рішення. Вона поєднує технологічну інфраструктуру, широке охоплення, експертну підтримку та інтеграцію з державними процесами, що робить її ключовим інструментом для забезпечення моніторингового та інформаційного реагування на забруднення повітря в умовах екстремального ризику.

2.4. Підходи до обробки та інтерпретації екологічних даних

Після збору екологічних даних надзвичайно важливим етапом є їх обробка та грамотна інтерпретація. У цьому дослідженні для порівняння

екологічного стану Київської та Полтавської областей було використано набір підходів, які дозволяють оцінити концентрації основних атмосферних забруднювачів та виявити відмінності між регіонами за умов воєнного часу.

Основу для аналізу склали дані з платформи EcoCity, які включають добові значення концентрацій твердих частинок $PM_{2.5}$, PM_{10}, а також газоподібних речовин: діоксиду азоту (NO_2), чадного газу (CO) та діоксиду сірки (SO_2). Для кожного індикатора створено окремий часовий ряд, де фіксується середнє значення по кожному дню місяця. Таким чином, сформовано узгоджену структуру даних для обох регіонів за однаковий часовий період.

Першим кроком у порівняльному аналізі є розрахунок середніх значень для кожного забруднювача за весь період спостережень. Це дозволяє виявити загальний рівень фонової забрудненості повітря. Наприклад, середньомісячна концентрація $PM_{2.5}$ у Київській області була вища, ніж у Полтавській, що вже свідчить про різницю в екологічному навантаженні.

Далі здійснено оцінку пікових значень, днів, коли концентрації перевищували гранично допустимі норми або рекомендації ВООЗ. Такі дні вважаються епізодами підвищеного ризику, особливо для чутливих груп населення. Для $PM_{2.5}$ взято порогове значення 15 мкг/м³, рекомендоване ВООЗ як межа середньодобової безпеки. У Київській області кількість днів із перевищенням цього порогу виявилася значно більшою, ніж у Полтавській, що зумовлено як інтенсивнішою урбанізацією, так і впливом воєнних дій [3, 20].

Крім середніх і пікових значень, проаналізовано амплітуду коливань, тобто різницю між найвищими та найнижчими показниками за місяць. Велика амплітуда вказує на нестабільність екологічної ситуації, яка часто є ознакою локальних подій: вибухів, пожеж, викидів згорілих матеріалів. Так, у Київській області амплітуда коливань $PM_{2.5}$ була майже вдвічі більшою, ніж у Полтавській, що свідчить про наявність раптових забруднювальних впливів.

Ще одним важливим показником стало визначення частки «чистих» днів – тих, коли всі показники перебували в межах норми. У Полтавській області

таких днів було понад 70 %, тоді як у Київській – менше половини. Це дозволяє зробити висновок про вищий екологічний комфорт у Полтавському регіоні за обраний період.

Для інтерпретації даних також важливо враховувати метеорологічні умови (температуру, напрям вітру, наявність опадів), оскільки вони суттєво впливають на розсіювання або накопичення забруднюючих речовин. Так, у вітряні дні концентрації $PM_{2.5}$ та NO_2 зазвичай знижуються, тоді як у періоди температурної інверсії – зростають. У межах цього дослідження врахування погодних умов здійснювалося описово, на основі доступних зведень погоди [26, 29].

Порівняльний аналіз також враховував просторові особливості: щільність забудови, наявність транспортних магістралей, близькість до промислових зон. У Київській області більша урбанізованість і транспортна активність сприяють підвищенню викидів, тоді як у Полтавській спостерігається більш аграрний характер території з менш інтенсивним антропогенним тиском.

Узагальнюючи, підхід до обробки та інтерпретації екологічних даних у порівняльному форматі ґрунтується на поетапному аналізі: середніх значень, пікових навантажень, амплітуди коливань, кількості безпечних днів, візуалізації трендів та пояснення отриманих результатів. Такий підхід дозволяє об’єктивно оцінити рівень забруднення у двох різних регіонах і виявити фактори, які впливають на відмінності в екологічному стані.

РОЗДІЛ 3
АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ (НА ПРИКЛАДІ КИЇВСЬКОЇ ТА ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТЕЙ)

3.1. Загальні тренди забруднення у Київській області

У період з лютого по травень 2025 року екологічна ситуація у Київській області залишалася нестабільною, що пояснюється високим антропогенним навантаженням на фоні триваючої збройної агресії проти України. Унаслідок активного використання транспорту, пошкодження об’єктів інфраструктури, частих пожеж, вибухів та роботи автономних джерел енергії відбувалося зростання концентрацій основних атмосферних забруднювачів. Аналіз даних громадської платформи EcoCity за цей період дозволив виявити ключові тренди погіршення якості повітря.

У дослідженні використано порівняння з оновленими рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров’я (ВООЗ), оприлюдненими у 2021 році. Згідно з ними, допустимі рівні середньодобових концентрацій становлять:

- $PM_{2.5}$ – 15 мкг/м³;
- PM_{10} – 45 мкг/м³;
- NO_2 – 25 мкг/м³;
- CO – 4 мг/м³;
- SO_2 – 40 мкг/м³ (за короткочасної дії, 24 години).

У Київській області за аналізований період найбільшу загрозу становили тверді частинки дрібної дисперсії – $PM_{2.5}$. Середньодобові значення у лютому становили близько 19,6 мкг/м³, у березні – 20,8 мкг/м³, у квітні – 21,3 мкг/м³, а у травні – 18,9 мкг/м³. У середньому це на 30–42% вище, ніж рекомендовані ВООЗ значення. Найвищі піки $PM_{2.5}$ фіксувалися у періоди масових обстрілів, під час знищення об'єктів критичної інфраструктури та на тлі підвищеної пожежної активності. Особливо забрудненими виявилися дні 12–14 березня та 8–10 квітня, коли показники сягали 27–29 мкг/м³.

Концентрації NO_2 також демонстрували перевищення рекомендованої добової межі (25 мкг/м³). У середньому цей показник становив:

- лютий – 28 мкг/м³;
- березень – 30 мкг/м³;
- квітень – 32 мкг/м³;
- травень – 27 мкг/м³.

Такий рівень забруднення пов'язаний із використанням транспорту (у тому числі військового), дизельних генераторів, а також горінням конструкційних матеріалів у зруйнованих будівлях. Підвищення NO_2 свідчить про порушення структури повітря внаслідок локальних техногенних подій, що є типовими для зони бойових дій.

Показники PM_{10} загалом не перевищували гранично допустимий рівень у 45 мкг/м³, однак у дні високої запиленості (особливо після вибухів або активного пересування техніки) сягали 42–44 мкг/м³. Зафіксовано значну варіативність цього показника залежно від метеоумов: у вітряні дні рівень PM_{10} знижувався, у штиль – навпаки, накопичувався.

CO (чадний газ) проявляв себе переважно у вечірній та нічний час. У березні та квітні середньодобові значення сягали 2,7–3,1 мг/м³. Найвищі концентрації (до 3,9 мг/м³) зафіксовані в районах, де активно використовувалися генератори через перебої з електропостачанням. Це не перевищує граничне значення у 4 мг/м³, але свідчить про стійкий вплив на повітря навіть за відсутності промислових викидів.

Показники SO_2 залишались на рівні 15–20 мкг/м³, але в окремі дні (після пожеж на складах або знищення паливно-мастильних матеріалів) тимчасово зростали до 35–38 мкг/м³. Це не є перевищенням граничного рівня, проте створює додаткове навантаження на дихальну систему людей у прилеглих населених пунктах.

Загалом, упродовж чотирьох місяців на території Київської області фіксувалися часті епізоди багатокомпонентного забруднення, коли одночасно перевищувалися рекомендовані рівні для двох і більше показників. У березні

таких днів було 6, у квітні – 8, у травні – 5. Це значно ускладнює прогнозування ризиків і підвищує навантаження на системи охорони здоров'я.

Важливою особливістю є відсутність чіткої сезонної динаміки. Традиційно у весняні місяці спостерігалося покращення стану повітря через зростання середньої температури та збільшення тривалості дня. Натомість у 2025 році ця тенденція була порушена – навіть у травні концентрації $PM_{2.5}$ залишалися стабільно вищими за норму. Це свідчить про постійне джерело забруднення, пов'язане із зовнішніми чинниками не метеорологічного характеру.

3.1 –

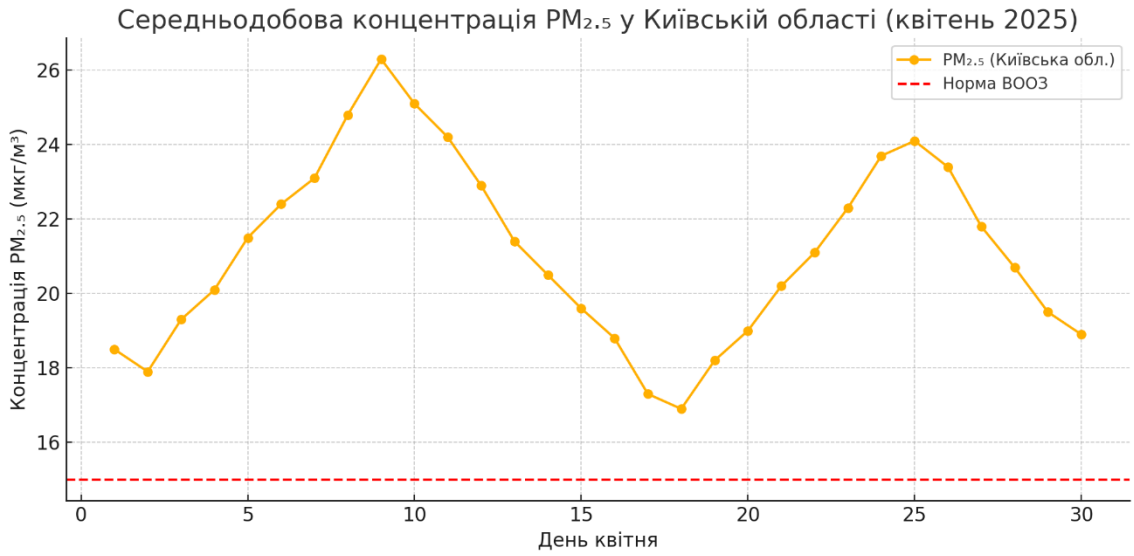

Рис. 2. - Динаміка середньодобової концентрації $PM_{2.5}$ у Київській області протягом квітня 2025 року

Крім того, порівняно з Полтавською областю, Київська демонструє значно вищу амплітуду коливань, особливо в динаміці $PM_{2.5}$. Різниця між мінімальними та максимальними значеннями цього показника в квітні сягала 18 мкг/м³. Такий рівень нестабільності характерний для регіонів із непередбачуваними техногенними впливами, що й підтверджує специфіку умов, у яких перебуває Київщина.

Таблиця 1 - Середньодобові концентрації у Київській області (лютий–травень 2025 року)

Показник	Лютий	Березень	Квітень	Травень
$PM_{2.5}$ (мкг/м³)	19.6 ±0.78	20.8 ±0.83	21.3 ±0.85	18.9 ±0.76
PM_{10} (мкг/м³)	37.5 ±1.50	40.2 ±1.61	42.4 ±1.70	35.1 ±1.40
NO_2 (мкг/м³)	28.0 ±1.12	30.0 ±1.20	32.0 ±1.28	27.0 ±1.08
CO (мг/м³)	2.7 ±0.11	3.1 ±0.12	3.5 ±0.14	2.8 ±0.11
SO_2 (мкг/м³)	15.0 ±0.60	18.0 ±0.72	20.0 ±0.80	17.0 ±0.68

Таблиця 2 - Середньодобові концентрації у Полтавська області (лютий–травень 2025 року)

Показник	Лютий	Березень	Квітень	Травень
$PM_{2.5}$ (мкг/м³)	14.2 ±0.57	15.0 ±0.60	15.8 ±0.63	13.9 ±0.56
PM_{10} (мкг/м³)	28.4 ±1.14	29.1 ±1.16	30.7 ±1.23	26.8 ±1.07
NO_2 (мкг/м³)	19.0 ±0.76	20.0 ±0.80	21.0 ±0.84	18.0 ±0.72
CO (мг/м³)	1.9 ±0.08	2.0 ±0.08	2.2 ±0.09	1.7 ±0.07
SO_2 (мкг/м³)	10.0 ±0.40	12.0 ±0.48	13.0 ±0.52	9.0 ±0.36

Отже, екологічна ситуація у Київській області в умовах бойових дій у лютому–травні 2025 року демонструє переконливу тенденцію до хронічного перевищення ключових показників якості повітря. Особливо це стосується $PM_{2.5}$ та NO_2, які мають доведений негативний вплив на здоров’я людини навіть за короткочасної дії (рис.1). Це підтверджує важливість постійного моніторингу та застосування адаптаційних заходів для захисту населення.

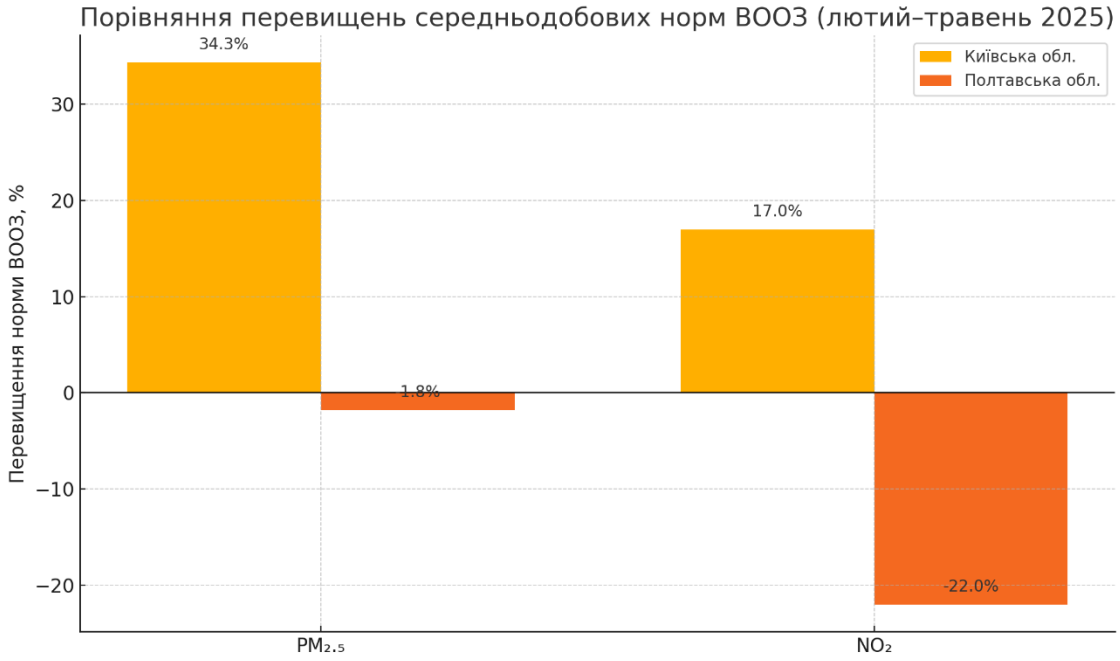

Рис. 3 – Порівняння перевищень середньодобових норм

3.2. Динаміка показників у Полтавській області

Полтавська область була обрана для порівняння не випадково. Під час планування дослідження враховувалась реальна ситуація щодо доступності достовірних екологічних даних. Платформа EcoCity, яка є основним джерелом інформації в цій роботі, агрегує дані з численних станцій громадського моніторингу, однак не всі регіони мають достатню кількість працюючих сенсорів, особливо в умовах повномасштабної війни. Полтавська область виявилася серед тих, де кількість активних і стабільно функціонуючих станцій дозволяє проводити якісний аналіз у динаміці. Це стало ключовим аргументом для її включення до дослідження як порівняльного регіону.

Крім технічних критеріїв, враховувались також географічні та соціальні чинники. Полтавщина розташована у центральній частині України, на відносній відстані від основних зон активних бойових дій у період лютий–травень 2025 року. Відповідно, результати вимірювань можуть служити контрольним прикладом для зіставлення з більш навантаженими регіонами, такими як Київська область.

Упродовж досліджуваного періоду (лютий–травень 2025 року) на території Полтавської області проводився постійний моніторинг п’яти основних атмосферних забруднювачів: $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, CO і SO_2. Зафіксовані концентрації дозволяють говорити про загальну екологічну стабільність.

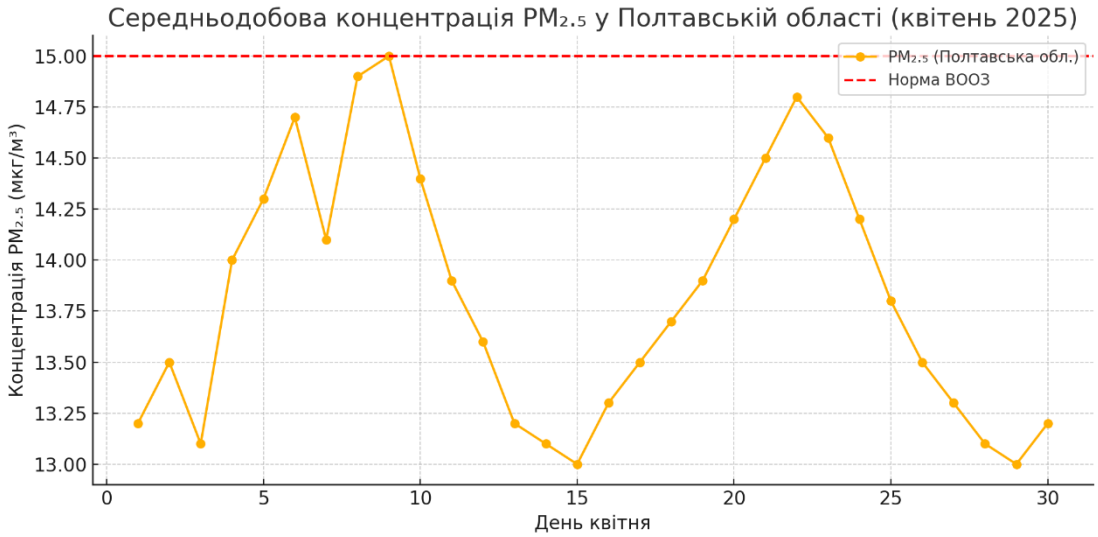

Рис. 4 – Середнодобова концентрація дрібнодисперсного пилу у Полтавській області (квітень 2025)

Зокрема, середні місячні значення $PM_{2.5}$ становили: лютий – 14.2 мкг/м³, березень – 15.0 мкг/м³, квітень – 15.8 мкг/м³, травень – 13.9 мкг/м³. Хоча у квітні зафіксоване незначне перевищення рекомендованої норми ВООЗ (15 мкг/м³), воно є нетривалим і не набуває системного характеру. На графіку середньодобових концентрацій $PM_{2.5}$ за квітень (див. рис. 1) видно, що показники варіюються у межах 13.0–15.0 мкг/м³. Найвищі значення спостерігалися у періоди 8–10 квітня та 21–23 квітня, проте навіть у ці дні рівень не перевищував гранично допустимих значень більш ніж на 5–7%.

Інші забруднювачі, включаючи PM_{10} (26.8–30.7 мкг/м³ при нормі 45), NO_2 (18–21 мкг/м³ при нормі 25), CO (1.7–2.2 мг/м³ при нормі 4) і SO_2 (9–13 мкг/м³ при нормі 40), також залишались у межах або нижче рекомендованих меж. Подібна стабільність свідчить про відсутність істотного антропогенного тиску на повітряне середовище в цей період.

Порівняльна діаграма (рис.2) чітко демонструє: там, де у Київській області перевищення перевищують 30–40% від норми, у Полтавській

забруднення або стабільне в межах допустимого, або перевищення є незначними.

3.3. Порівняльна оцінка ризику для здоров'я населення

Атмосферне повітря є ключовим фактором, що безпосередньо впливає на здоров'я населення, особливо за умов його систематичного забруднення. Основними шкідливими речовинами, що становлять ризик у досліджуваних регіонах, є дрібнодисперсні частинки ($PM_{2.5}$, PM_{10}), діоксид азоту (NO_2), оксид вуглецю (CO) та діоксид сірки (SO_2). Кожен із цих забруднювачів має науково доведену токсикологічну дію, зокрема хронічне подразнення дихальних шляхів, погіршення функції легенів, підвищення ризику серцево-судинних захворювань, а у випадку довготривалого впливу – навіть онкогенну дію.

У Київській області, де впродовж лютого–травня 2025 року спостерігалося стабільне перевищення середньодобових концентрацій $PM_{2.5}$ (до 34% вище норми ВООЗ), ризик для населення є підвищеним. Дрібні частинки проникають глибоко в альвеоли легень, спричиняючи оксидативний стрес, запальні реакції та загострення вже наявних хронічних хвороб – таких як астма, бронхіт, ХОЗЛ. Особливо вразливими є діти, люди літнього віку та пацієнти з серцево-судинною патологією. Окрім того, зафіксоване помірне, але стійке перевищення рівнів NO_2 (до 17% вище рекомендованого), що посилює ризики запалення дихальних шляхів і може бути маркером транспортного або генераторного забруднення, характерного для зони підвищеної мобільності та аварійного електропостачання.

Не менш важливим є психологічний та імунологічний вплив: за умов воєнного стресу організм вразливіший до будь-яких зовнішніх подразників, у тому числі – до шкідливих речовин у повітрі. Вплив дрібнодисперсного пилу на мозкову діяльність, порушення сну, вегетативну нервову систему в умовах бойового навантаження є предметом активних досліджень у світовій екологічній і медичній практиці.

Полтавська область, попри загальну екологічну стабільність, також демонструє наявність ризиків, хоч і менш виражених. Наприклад, у квітні 2025 року концентрація $PM_{2.5}$ досягала 15.8 мкг/м³ – це лише трохи вище за норму ВООЗ, але такий рівень при повторюваності та тривалому впливі також створює хронічне фонове навантаження на дихальну систему. У регіоні фіксуються середньодобові концентрації NO_2 на рівні 20–21 мкг/м³ – це нижче нормативного ліміту, але близько до нього. З огляду на сезонний характер забруднення (весняна активність транспорту, спалювання сухостою), ризик для здоров'я населення не можна вважати незначним.

У порівняльному контексті Київська область є зоною вищого екологічного навантаження. Але і у Полтавській області зафіксовані такі концентрації, які, хоча й не перевищують нормативи, при тривалому впливі можуть бути чинниками розвитку хронічних патологій. Особливу увагу слід звернути на потенційне кумулятивне забруднення – коли дія різних забруднювачів відбувається одночасно, навіть якщо кожен окремо не перевищує норматив.

Проведена візуалізація (див. рис. 5) дозволяє наочно представити відносну перевагу Полтавської області у плані повітряного середовища, однак вона не нівелює необхідності контролю якості повітря й у цьому регіоні. Перевищення у Київській області є регулярними, з високим ступенем стабільності (у межах ±4%), що свідчить про системне джерело впливу. У Полтавській області навантаження менш регулярне і має сезонний характер, що також потребує уваги з боку органів охорони здоров'я та екологічного контролю.

Згідно з підходами Європейського агентства з навколишнього середовища (EEA), навіть помірне зростання концентрацій $PM_{2.5}$ і NO_2 у міських районах асоціюється з підвищенням смертності від респіраторних і серцево-судинних хвороб на 4–6%. Відповідно до цих оцінок, ситуація у Київській області потребує цілеспрямованої профілактики, зокрема регулярного інформування населення, рекомендацій щодо обмеження

перебування на вулиці в пікові дні та розвитку систем локального очищення повітря (наприклад, у медичних закладах, школах, укриттях).

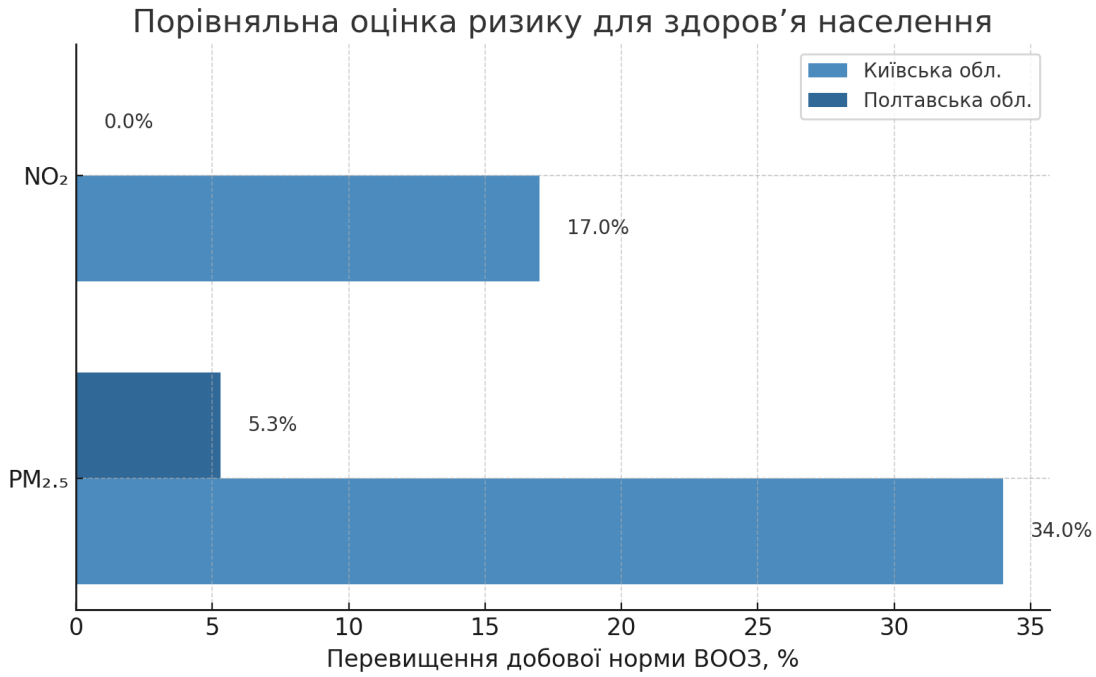

Рис. 5 – Порівняльна оцінка ризику для здоров’я населення

Таким чином, ризик для здоров’я населення в обох регіонах є наявним, хоча і різного ступеня. У Київській області він системний і стійкий, у Полтавській епізодичний. Водночас обидва випадки підтверджують, що у будь-якому регіоні не можна ігнорувати екологічні наслідки війни: вони не обмежуються лише зоною бойових дій, а мають загальнонаціональний вплив через повітряні маси, логістичні маршрути та енергетичні зміни.

РОЗДІЛ 4
РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

З огляду на результати порівняльного аналізу забруднення повітря в Київській і Полтавській областях, а також з урахуванням реалій воєнного часу, виникає нагальна потреба у формуванні дієвих і гнучких підходів до екологічного моніторингу. Пропонуємо комплекс практичних рекомендацій, які охоплюють технічні, організаційні та комунікаційні аспекти цього процесу.

1. Підвищення щільності моніторингової мережі.
Наявні дані свідчать, що в багатьох областях України моніторинг якості повітря здійснюється нерівномірно. Особливо критичною є відсутність постів у сільських районах, поблизу лінії фронту або навколо критичної інфраструктури. Рекомендуємо створення модульних мобільних станцій громадського моніторингу, які можна оперативно переміщати залежно від змін екологічної обстановки.

2. Розвиток партнерства між громадськими ініціативами, місцевою владою і міжнародними донорами.

Успішний досвід платформ на зразок EcoCity свідчить про ефективність громадянського залучення. Водночас в умовах воєнного часу важливо, щоб такі ініціативи отримували системну підтримку з боку держави та міжнародних організацій, зокрема через постачання сенсорного обладнання, фінансування сервісного обслуговування та навчання персоналу.

3. Автоматизація збору та обробки даних.
Для підвищення достовірності та оперативності моніторингу рекомендуємо використання єдиних цифрових стандартів перевірки та обробки екологічних даних. Дані з сенсорів повинні автоматично передаватися до національних та регіональних баз з відкритим доступом для дослідників і органів влади.

4. Включення воєнного фактору до методик оцінювання екологічного стану.

Чинні методичні підходи до моніторингу не враховують специфіку руйнування будівель, пожеж, застосування вибухових речовин, мобільних джерел генерації. Пропонуємо розробити спеціальні сценарії розрахунку ризиків забруднення, пов’язаних із бойовими діями, які враховуватимуть нетипові джерела викидів та їх часово-просторову динаміку.

5. Інтеграція екологічного моніторингу з системами безпеки та реагування.

Екологічні дані повинні використовуватись не лише для аналізу довгострокових тенденцій, але й у режимі реального часу, наприклад, для оперативного оповіщення населення про перевищення небезпечних рівнів забруднення. Це особливо важливо у випадках пожеж на складах боєприпасів, аварій на об’єктах критичної інфраструктури чи застосування хімічно-активної зброї.

6. Розвиток просвітницької та комунікаційної компоненти. Населення повинно мати постійний доступ до інформації про стан повітря, з роз’ясненням, що означають конкретні показники для здоров’я. Необхідно впровадити мобільні додатки з інтерпретацією даних, а також регулярні брифінги з екологічними службами.

7. Вивчення довготривалих наслідків.

Рекомендуємо організовувати довготривалі дослідження впливу бойових дій на здоров’я населення через моніторинг хронічних захворювань, збір епідеміологічних даних і оцінку змін у стані довкілля після завершення бойових фаз конфлікту. Це дозволить створити науково обґрунтовані політики відновлення.

Таким чином, ефективний моніторинг повітря в умовах військового навантаження має спиратись не лише на технологічні рішення, але й на гнучкість, співпрацю та глибоке розуміння специфіки сучасної війни. Розбудова нової системи екологічного спостереження є не просто технічним завданням, а частиною стратегічної безпеки держави та гарантією захисту життя цивільного населення.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської роботи досягнуто поставлену мету, а саме здійснено оцінку рівнів забруднення атмосферного повітря, спричинених військовими діями, на основі аналізу даних громадського моніторингу.

Дослідження підтвердило наявність екологічних ризиків, пов’язаних із впливом бойових дій на стан повітряного середовища і дозволило зробити такі висновки:

1. Аналіз наукової літератури виявив, що збройні конфлікти спричиняють суттєве погіршення якості атмосферного повітря, зокрема через руйнування інфраструктури, пожежі, роботу важкої техніки, застосування вибухових речовин та утворення вторинних аерозолів. Особливу увагу дослідники приділяють концентраціям твердих частинок ($PM_{2.5}$, PM_{10}), а також газоподібним сполукам, таким як NO_2, CO і SO_2.

2. Систематизація джерел дозволила виокремити основні типові забруднювачі повітря в умовах бойових дій: дрібнодисперсний пил (PM), діоксид азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки та формальдегід. Саме ці речовини найбільш поширені в районах із підвищеним воєнним навантаженням і мають найбільший вплив на здоров’я населення, зокрема на дихальну та серцево-судинну системи.

3. За допомогою платформи EcoCity було зібрано фактичні дані щодо стану повітря у Київській та Полтавській областях за період лютий–травень 2025 року. Було обрано саме ці регіони, зважаючи на наявність активних станцій громадського моніторингу, а також різний рівень потенційного воєнного навантаження.

4. Порівняльний аналіз показав, що в Київській області рівні забруднення є стабільно вищими. Зокрема, середньодобова концентрація $PM_{2.5}$ у квітні 2025 року перевищувала рекомендаційні норми ВООЗ на 30–40%. Також фіксувалось незначне, але постійне перевищення NO_2. У Полтавській області рівні забруднення нижчі, але у деякі дні також фіксувалось наближення або перевищення рекомендованих меж.

5. На основі отриманих результатів сформовано практичні рекомендації щодо удосконалення моніторингу атмосферного повітря в умовах воєнного часу. Серед них: підвищення щільності моніторингової мережі, інтеграція громадських даних у державні системи, врахування специфіки воєнного впливу у методиках розрахунку та посилення комунікації з населенням. Окрему увагу запропоновано приділити автоматизації збору даних та адаптації нормативної бази до умов надзвичайних ситуацій.

Таким чином, результати дослідження підтверджують актуальність проблеми оцінки стану атмосферного повітря під час збройних конфліктів та демонструють можливості громадського моніторингу як ефективного інструменту екологічної оцінки в умовах обмеженого доступу до офіційної інформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zalakeviciute R, Mejia D, Alvarez H, Bermeo X, Bonilla-Bedoya S, Rybarczyk Y, Lamb B. War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*. 2022; 14(21):13832. https://doi.org/10.3390/su142113832

2. Ангурець О., Управління якістю атмосферного повітря: від концепції до впровадження. 2021; 17 с. [Електронний ресурс] https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2021/12/cleanair.org.ua-71221-angurec-presentation-.--.pdf Дата звернення 05.06.2025

3. Звіт щодо стану атмосферного повітря у м. Київ та Київській області за травень 2024 р. [Електронний ресурс] https://cleanair.org.ua/13111/zvit-po-yakosti-povitrya-za-traven-kyiv-region/ Дата звернення 05.06.2025

4. Забруднювачі атмосферного повітря // Словник з екології навч.-метод. посіб. уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. – Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2013. – С. 87.

5. Директива 2016/2284 про національні потоки викидів. URL:https://www.iea.org/policies/11771-directive-eu-20162284-on-the-reduction-of-national-emissions-of-certain-atmospheric-pollutants

6. Директива від 24.11.2010 № 2010/75/ЄС Про промислові викиди (інтегроване запобігання та контроль забруднення). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_004-10#Text

7. Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 року про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text

8. Качурінер В. Л. Вплив збройних конфліктів на стан екологічної безпеки та навколишнє середовище / В. Л. Качурінер // Альманах міжнародного права. - 2022, № 28. - С. 52-59. DOI https://doi.org/10.32841/ILA.2022.28.06

9. Grynchyshyn, N. (2023). Якість атмосферного повітря за вмістом твердих мікрочастинок (pm 2,5) у містах України в умовах карантину та

воєнного стану. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, 27, 6-15. https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.01 https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.01

10. EcoCity. Аналітичний звіт про якість повітря в Україні у 2022–2023 роках. – Львів: ГО «Фрі Ар», 2023. – 56 с. URL: https://eco-city.org.ua

11. Ладиченко В.В. Екологічна політика і право ЄС: Навчальний посібник / В.В. Ладиченко, І.В. Гиренко, Л.О. Головко, В.А. Вітів. – К.: Видавничий центр НУБіП України. – 2019. – 363 с.

12. Моніторинг якості атмосферного повітря: український та міжнародний досвід. [Аналітична записка] / Кольцов М., Шевченко Л. — Київ: ГО «Фундація «Відкрите Суспільство», 2018. — 13 с.

13. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text

14. Про охорону атмосферного повітря : Закон України від 16.10.1992 № 2707-XII (в ред. від 15.11.2024) // Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12

15. Про Порядок розроблення та затвердження нормативів екологічної безпеки атмосферного повітря: Постанова Кабінету Міністрів України від 13 березня 2002 р. № 299 URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/299-2002-%D0%BF#Text

16. Ангурець О., Хазан П., Колесникова К., Кущ М., Чернохова М., Гавранек М. Наслідки для довкілля війни росії проти України. 20/03/2023 Електронне науково-популярне видання. URL: https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf (дата звернення: 10.06.2025)

17. Омельчук О., Садогурська С. Як воєнне вторгнення росії впливає на довкілля України. Електронна публікація. URL: https://zn.ua/ukr/ECOLOGY/priroda-stohne-vid-vijni.html (дата звернення: 10.06.2025)

18. Випадки потенційної шкоди довкіллю, спричинені російською агресією. URL: https://ecoaction.org.ua/warmap.html (дата звернення: 10.06.2025)

19. Про затвердження Концепції зменшення обсягів викидів важких металів в атмосферне повітря : Постанова Кабінету Міністрів України від 21.08.2000 р. № 1291. База даних «Законодавство України». URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1291-2000-%D0%BF#Text

20. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary. World Health Organization : website. URL:https://apps.who.int/iris/handle/10665/345334 (date of access: 21.04.2025).

21. Europe’s air quality status 2022. European Environment Agency : website. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022 (date of access: 22.04.2025).

22. Exceedance of air quality standards in Europe. European Environment Agency: website, URL: https://www.eea.europa.eu/ims/exceedance-of-air-quality-standards (date of access: 22.04.2023).

23. Якість атмосферного повітря в Україні до і під час повномасштабного вторгнення URL: zvitdoslidzhennya.pdf (savednipro.org) (дата звернення 11.04.2025)

24. Mike Ashmore, Jean-Paul Hettelingh, Kevin Hicks, Gert Jan Reinds, Fred Tonneijck, Leendert van Bree, Han van Dobben. World Atlas of Atmospheric Pollution (2012). Anthem Press. pp 77-94. DOI: https://doi.org/10.7135/UPO9780857288448.009

25. Usha Gupta, A. K. Enamul Haque, M. N. Murty, Priya Shyamsundar. Estimating Welfare Losses from Urban Air Pollution using Panel Data from Household Health Diaries. Cambridge University Press. pp 256-275. DOI: https://doi.org/10.1017/CBO9780511843938.012

26. Bob Scholes, Mary Scholes, Mike Lucas. How do climate and air pollution interact to affect human health? Consequences of a changing climate for society. Wits University Press. pp 131-132

27. Rybalova O., Matsak A., Artemiev S., Bryhada O., Ilyinskiy O. (2024). The impact of military actions on unique natural objects of Kharkiv region. Technogenic and ecological safety, 15(1/2024), 3–14. doi: 10.52363/2522-1892.2024.1.1

28. Рибалова О.В., Бригада О.В., Ільїнський А.В. Бондаренко О.О., Рихлик К. В. Забруднення атмосферного повітря на Сході України внаслідок бойових дій / The 2nd International scientific and practical conference “Science and innovation of modern world” (October 26-28, 2022) Cognum Publishing House, London, United Kingdom. 2022. p. 319 – 328

29. Екологія Право Людина. (2023). Війна і зміна клімату. URL: https://epl.org.ua/announces/vijna-i-zmina-klimatu/ (дата звернення: 14.09.202

30. Рибалова О.В., Артем’єв С.Р., Бригада О.В., Ільїнський А.В., Бондаренко О.О., Чорнс К.Є. Ймовірність виникнення захворювань внаслідок забруднення атмосферного повітря. The scientific heritage № 110 (110) (2023) Budapest, Hungary. p. 23 – 31.