

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного
Факультет агротехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. каф. геоекології і землеустрою

доцент _____ Максим ГАНЧУК

“_ 19 _” січня 2026 р.

Пояснювальна записка

до дипломної роботи здобувача СВО Магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему: **«Визначення порогових значень для оцінки рівня забруднення атмосфери з використанням методів ГІС-аналізу під час війни»**

25 ГЗ Д 002 000000 ПЗ

Виконав: здобувачка ВО 2М курсу, групи 21 МБГЗ
спеціальності 193 Геодезія та землеустрій
за ОПП Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності та ОПП)

Здобувач вищої освіти _____ Яна КАПІНУС
(підпис) (П.І.П)

Керівник, професор _____ Віктор СИДОРЕНКО
(підпис) (П.І.П)

Консультант, доцент _____ Михайло ЗОРЯ
(підпис) (П.І.П)

Нормоконтроль, доцент _____ Вікторія СКИБА
(підпис) (П.І.П)

Запоріжжя - 2026 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

Інститут або факультет факультет агротехнологій та екології
Кафедра геоекології і землеустрою

Ступінь вищої освіти Магістр
Галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Освітня програма «Геодезія та землеустрій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ГЕЗ

к.с.-г.н., доцент Максим ГАНЧУК

« 10 » січня 2026 р

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

студенту Капінус Яна Володимирівна

1. Тема роботи **Визначення порогових значень для оцінки рівня забруднення атмосфери з використанням методів ГІС-аналізу під час війни**

керівник роботи д.т.н., професор Сидоренко Віктор Дмитрович

затверджені наказом Ректора університету від «31» жовтня 2025 р. № 585/3-С

Строк подання студентом роботи «30» січня 2026 р.

Вихідні дані до роботи дані відділу статистики, держгеокадастру; дані ГІС та ДЗЗ.

Перелік питань, які потрібно розробити: теоретичні та методологічні основи оцінки забруднення атмосфери; методика геоінформаційного аналізу забруднення атмосферного повітря; визначення порогових значень для оцінки рівня забруднення атмосфери з використанням методів ГІС-аналізу під час війни в Україні; програмне забезпечення та інтерактивні методи ГІС-аналізу під час війни в Україні; розроблення програмного модуля оцінки та візуалізації атмосферного забруднення з використанням ГІС-аналізу, супутникових даних та метеорологічної інформації.

Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав (дата)	завдання прийняв
Розділ 6 Охорона праці в галузі	Михайло ЗОРЯ, к.т.н., доцент, завідувач кафедри цивільної безпеки	15.10.2025	15.10.2025

Дата видачі завдання

15.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи (місяць)	Відмітка керівника про виконання (засвідчується підписом)
Розділ 1. Теоретичні та методологічні основи оцінки забруднення атмосфери	вересень	Виконано
Розділ 2. Методика геоінформаційного аналізу забруднення атмосферного повітря	жовтень	Виконано
Розділ 3. Визначення порогових значень для оцінки рівня забруднення атмосфери з використанням методів ГІС-аналізу під час війни в Україні	жовтень	Виконано
Розділ 4. Програмне забезпечення та інтерактивні методи ГІС-аналізу під час війни в Україні	листопад	Виконано
Розділ 5. Розроблення програмного модуля оцінки та візуалізації атмосферного забруднення з використанням ГІС-аналізу, супутникових даних та метеорологічної інформації	грудень	Виконано
Розділ 6. Охорона праці в галузі	січень	Виконано
Висновки	січень	Виконано

Студентка _____ . Я.В. Капінус
(підпис) (ініціали та прізвище)Керівник роботи В.Д. Сидоренко
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Капінус Я.В. Визначення порогових значень для оцінки рівня забруднення атмосфери з використанням методів ГІС-аналізу під час війни. Магістерська робота. Кафедра геоєкології і землеустрою. Запоріжжя, ТДАТУ ім. Д. Моторного, 2026. С. 65

Текст викладений на 60 сторінках, містить 6 розділів, 5 таблиць, 19 літературних джерела.

Актуальність теми дослідження

Атмосферне повітря є одним із ключових компонентів навколишнього природного середовища, стан якого безпосередньо впливає на здоров'я населення, екологічну безпеку та сталий розвиток територій. Забруднення атмосфери залишається однією з найгостріших екологічних проблем сучасності, особливо в регіонах з високою концентрацією промислових об'єктів та щільною мережею транспортної інфраструктури.

В умовах повномасштабної війни в Україні проблема забруднення атмосферного повітря набула принципово нового змісту. Бойові дії супроводжуються масовими пожежами, вибухами боєприпасів, руйнуванням промислових підприємств, складів пального, енергетичних об'єктів та житлової забудови. Унаслідок цього в атмосферу надходять значні обсяги твердих часток, токсичних газів і вторинних забруднювачів, що формують складну та динамічну просторову картину екологічного навантаження.

Мета роботи: розроблення та наукове обґрунтування методики визначення порогових значень рівня забруднення атмосферного повітря з використанням методів геоінформаційного аналізу в умовах воєнних дій, а також оцінка просторового розподілу екологічних ризиків на території України.

Ключові слова: атмосферне повітря, забруднення, супутникові знімки, ДЗЗ, ГІС, NDVI.

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ	13
1.1 Сучасні підходи до моніторингу якості атмосферного повітря	13
1.2 Методи ГІС-аналізу в екологічних дослідженнях.....	15
1.3 Особливості оцінки забруднення атмосфери в умовах воєнних дій.....	16
1.4 Вплив воєнних дій на формування екологічних загроз та забруднення атмосферного повітря	18
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....	23
2.1 Вихідні дані та джерела інформації для проведення дослідження.....	23
2.2 Методика геоінформаційного та просторово-статистичного аналізу забруднення атмосферного повітря.....	24
2.3 Результати просторового аналізу розподілу забруднення атмосферного повітря	27
2.4 Кластеризація територій за рівнем забруднення атмосфери	28
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ПОРОГОВИХ ЗНАЧЕНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ГІС- АНАЛІЗУ ПІД ЧАС ВІЙНИ В УКРАЇНІ.....	30
3.1 Просторові особливості забруднення атмосферного повітря на території України в умовах воєнних дій.....	30
3.2 Визначення порогових значень рівнів забруднення атмосферного повітря.	31
3.3 Картографічне моделювання зон екологічної небезпеки	32
3.4 Практичні рекомендації щодо використання результатів дослідження.....	32
РОЗДІЛ 4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНТЕРАКТИВНІ МЕТОДИ ГІС-АНАЛІЗУ ПІД ЧАС ВІЙНИ В УКРАЇНІ	34
4.1 Роль програмного забезпечення ГІС у дослідженнях забруднення атмосфери в умовах воєнних дій.....	34
4.2 Класифікація програмного забезпечення ГІС, що використовується під час	

війни.....	36
4.3 Настільні ГІС-платформи та їх застосування.....	38
4.4 Веб-ГІС та інтерактивні онлайн-платформи	39
4.5 Інтерактивні методи ГІС-аналізу.....	41
4.6 Обмеження та перспективи розвитку ГІС-інструментів у воєнний період ..	44
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ОЦІНКИ ТА	
ВІЗУАЛІЗАЦІЇ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ З	
ВИКОРИСТАННЯМ ГІС-АНАЛІЗУ, СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ТА	
МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	47
5.1 Наукова ідея, мета та концепція програмного рішення.....	47
5.2 Архітектура програмного модуля та обґрунтування вибору технологій.....	48
5.3 Методи обробки даних та математичні моделі.....	49
5.4 Алгоритм роботи програмного модуля.....	50
5.5 Інструкція користувача та практичне застосування.....	52
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ	
СИТУАЦІЯХ ПРИ ВИКОНАННІ ГІС-АНАЛІЗУ В УМОВАХ ВОЄННОГО	
СТАНУ В УКРАЇНІ	58
6.1 Загальні вимоги нормативних актів щодо управління охороною праці та безпекою у надзвичайних ситуаціях для підприємств, установ та працівників, що здійснюють ГІС-дослідження	58
6.2 Постановка завдання щодо досліджень з питань охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях у контексті виконання ГІС-аналізу забруднення атмосфери.....	59
6.3 Аналітично-розрахункова частина з питань охорони праці при виконанні ГІС-аналізу	60
6.4 Аналітично-розрахункова частина з питань безпеки у надзвичайних ситуаціях (цивільного захисту) з урахуванням воєнних загроз	61
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	66

ВСТУП

Атмосферне повітря є одним із ключових компонентів навколишнього природного середовища, стан якого безпосередньо впливає на здоров'я населення, екологічну безпеку та сталий розвиток територій. Забруднення атмосфери залишається однією з найгостріших екологічних проблем сучасності, особливо в регіонах з високою концентрацією промислових об'єктів та щільною мережею транспортної інфраструктури.

В умовах повномасштабної війни в Україні проблема забруднення атмосферного повітря набула принципово нового змісту. Бойові дії супроводжуються масовими пожежами, вибухами боєприпасів, руйнуванням промислових підприємств, складів пального, енергетичних об'єктів та житлової забудови. Унаслідок цього в атмосферу надходять значні обсяги твердих часток, токсичних газів і вторинних забруднювачів, що формують складну та динамічну просторову картину екологічного навантаження.

Особливістю воєнного періоду є також обмеження або повне припинення роботи традиційних систем наземного екологічного моніторингу на окремих територіях. Це ускладнює оперативну оцінку стану атмосферного повітря та прийняття обґрунтованих управлінських рішень. У зв'язку з цим зростає роль альтернативних підходів до аналізу екологічної інформації, зокрема методів геоінформаційного аналізу та дистанційного зондування Землі.

Геоінформаційні системи дозволяють інтегрувати різноманітні просторові дані, виконувати їх аналітичну обробку, моделювати просторові закономірності забруднення та візуалізувати результати у вигляді тематичних карт. Для спеціальності «Геодезія та землеустрій» застосування ГІС у екологічних дослідженнях є особливо актуальним, оскільки ґрунтується на використанні координатних систем, просторових моделей та методів картографування.

Окремою науковою проблемою є визначення порогових значень рівнів забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій. Існуючі нормативні підходи переважно орієнтовані на мирний час і не враховують специфіку

воєнних джерел забруднення та їх просторову мінливість. Це зумовлює необхідність розроблення адаптивних підходів до порогової оцінки, що базуються на просторово-статистичному аналізі та результатах ГІС-моделювання.

Актуальність теми. У сучасних умовах інтенсивного антропогенного навантаження проблема забруднення атмосферного повітря є однією з ключових екологічних загроз для сталого розвитку територій та безпеки населення. Особливої гостроти ця проблема набула в Україні внаслідок повномасштабних воєнних дій, які супроводжуються руйнуванням промислової та транспортної інфраструктури, масовими пожежами, вибухами, переміщенням військової техніки та використанням боєприпасів. Усе це призводить до різкого зростання концентрацій забруднювальних речовин у атмосферному повітрі та формування зон підвищеного екологічного ризику.

Традиційні підходи до оцінки якості атмосферного повітря в умовах війни є обмеженими через пошкодження стаціонарних постів моніторингу, нерегулярність спостережень та фрагментарність даних. У зв'язку з цим особливо актуальним є використання геоінформаційних систем і даних дистанційного зондування Землі, які дозволяють здійснювати просторово-часовий аналіз забруднення атмосфери, інтегрувати різноманітні джерела інформації та отримувати об'єктивну картину екологічного стану територій навіть за відсутності наземних вимірювань.

Важливим науково-практичним завданням є визначення порогових значень рівнів забруднення атмосферного повітря, які дозволяють класифікувати території за ступенем екологічної небезпеки та оперативно оцінювати ризики для населення. Розроблення таких підходів із застосуванням методів ГІС-аналізу в умовах воєнних дій є актуальним як для потреб екологічного моніторингу, так і для підтримки прийняття управлінських рішень у сфері територіального планування та післявоєнного відновлення.

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є розроблення та наукове обґрунтування методики визначення порогових значень рівня забруднення атмосферного повітря з використанням методів геоінформаційного аналізу в

умовах воєнних дій, а також оцінка просторового розподілу екологічних ризиків на території України.

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети у роботі передбачається вирішення таких завдань:

1. Опрацювати наукові публікації, методичні матеріали та нормативні документи з питань моніторингу якості атмосферного повітря та застосування ГІС-технологій.

2. Проаналізувати сучасні підходи до оцінки забруднення атмосфери з використанням супутникових і наземних даних.

3. Дослідити особливості формування забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій.

4. Сформувати геоінформаційну базу даних для аналізу показників якості атмосферного повітря.

5. Визначити порогові значення концентрацій забруднювальних речовин для оцінки рівнів екологічного ризику.

6. Провести просторове зонування території України за рівнем забруднення атмосферного повітря.

7. Розробити практичні рекомендації щодо використання результатів дослідження в системах екологічного моніторингу.

Об'єкт дослідження – процеси формування та просторового розподілу забруднення атмосферного повітря на території України в умовах воєнних дій.

Предмет дослідження – методи та результати геоінформаційного аналізу показників якості атмосферного повітря, а також порогові значення концентрацій забруднювальних речовин для оцінки рівнів екологічного ризику.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи дослідження:

- **загальнонаукові методи** – аналіз, синтез, узагальнення науково-технічної літератури та нормативних документів;

- **геоінформаційні методи** – створення та аналіз просторових баз даних, картографування, просторове зонування;

- **просторово-статистичні методи** – інтерполяція даних, кореляційний та кластерний аналіз;

- **методи дистанційного зондування Землі** – обробка супутникових даних для оцінки забруднення атмосферного повітря;

- **пороговий аналіз** – визначення граничних і критичних рівнів забруднення для класифікації територій за ступенем екологічної небезпеки.

Застосування комплексного підходу дозволило отримати об'єктивні результати та зробити обґрунтовані висновки щодо оцінки рівня забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні підходів до визначення порогових значень рівня забруднення атмосферного повітря на основі геоінформаційного аналізу в умовах воєнних дій. У роботі запропоновано інтеграцію супутникових і наземних даних з використанням методів просторової кластеризації, що дозволяє підвищити точність оцінки екологічного стану територій.

Вперше для умов воєнного часу в Україні здійснено комплексне просторове зонування територій за рівнем забруднення атмосферного повітря з урахуванням порогових значень концентрацій забруднювальних речовин. Отримані результати можуть бути використані як наукова основа для подальших досліджень у галузі екологічного моніторингу та геоінформаційних технологій.

Практичне значення кваліфікаційної магістерської роботи полягає у можливості використання отриманих результатів у діяльності органів державного управління, екологічних служб та органів місцевого самоврядування для оцінки екологічного стану територій, планування заходів з мінімізації негативного впливу забруднення атмосферного повітря та підтримки процесів післявоєнного відновлення.

У зв'язку з викладеним тема магістерської роботи є актуальною, науково обґрунтованою та такою, що має важливе практичне значення для екологічного моніторингу, просторового планування та оцінки екологічних ризиків в Україні в умовах війни та післявоєнного відновлення.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ

1.1 Сучасні підходи до моніторингу якості атмосферного повітря

Атмосферне повітря є одним із ключових компонентів навколишнього природного середовища, стан якого безпосередньо впливає на здоров'я населення, функціонування екосистем та сталий розвиток територій. У сучасних умовах антропогенне навантаження на атмосферу постійно зростає, що зумовлює необхідність удосконалення підходів до моніторингу та оцінювання рівнів її забруднення. Особливої актуальності ці питання набули в умовах повномасштабної війни, коли джерела забруднення атмосфери набувають нових, нетипових форм і масштабів.

Воєнні дії супроводжуються масовими вибухами, пожежами, руйнуванням промислових і транспортних об'єктів, нафтобаз, енергетичної інфраструктури, а також активним переміщенням військової техніки. Усе це призводить до значного викиду в атмосферне повітря твердих часток (PM_{2.5}, PM₁₀), оксидів азоту, сірки, вуглецю, важких металів та інших токсичних сполук. Водночас традиційні системи екологічного моніторингу в умовах війни часто є фрагментованими, обмеженими або частково недоступними, що ускладнює отримання репрезентативної інформації про просторово-часову динаміку забруднення атмосфери.

У цьому контексті особливого значення набуває застосування геоінформаційних систем (ГІС) та методів просторового аналізу, які дозволяють інтегрувати дані різної природи (наземні вимірювання, супутникові спостереження, модельні оцінки), здійснювати їх візуалізацію та проводити комплексний аналіз екологічного стану територій. Для спеціальності «Геодезія та землеустрій» використання ГІС-технологій є базовим інструментарієм, що дає змогу вирішувати прикладні завдання просторової оцінки та прогнозування.

Окремою науковою проблемою є визначення порогових значень показників забруднення атмосферного повітря, які дозволяють класифікувати рівні екологічної небезпеки та приймати обґрунтовані управлінські рішення. В умовах війни традиційні нормативи та гранично допустимі концентрації не завжди адекватно відображають реальні ризики, що зумовлює необхідність їх перегляду або адаптації з урахуванням просторового контексту та інтенсивності воєнного впливу.

Моніторинг якості атмосферного повітря є складовою системи екологічного контролю та спрямований на отримання достовірної інформації про концентрації забруднювальних речовин, їх просторово-часову динаміку та вплив на довкілля і здоров'я населення. У сучасних умовах моніторинг атмосфери розглядається як багаторівнева система, що поєднує наземні, дистанційні та модельні підходи.

Традиційні системи моніторингу базуються на мережах стаціонарних постів спостереження, які здійснюють безперервні або періодичні вимірювання основних забруднювальних речовин, зокрема твердих часток (PM_{2.5}, PM₁₀), оксидів азоту, діоксиду сірки, оксиду вуглецю та приземного озону. Перевагою таких систем є висока точність вимірювань, однак їх суттєвим недоліком залишається обмежене просторове покриття, особливо в регіонах зі складною безпековою ситуацією.

У зв'язку з цим дедалі більшого значення набуває використання методів дистанційного зондування Землі. Супутникові платформи дозволяють отримувати регулярні дані про стан атмосфери на великих територіях, незалежно від доступності наземної інфраструктури. Особливу роль у сучасних екологічних дослідженнях відіграють місії Sentinel-5P, MODIS, VIIRS, які забезпечують спостереження за концентраціями аерозолів та газоподібних домішок.

Сучасний підхід до моніторингу атмосферного повітря передбачає інтеграцію наземних і супутникових даних з використанням геоінформаційних систем. Така інтеграція дозволяє підвищити репрезентативність оцінок, зменшити невизначеність результатів та забезпечити просторову узгодженість

екологічної інформації. У межах цього підходу ГІС виступає як платформа для зберігання, аналізу та візуалізації даних моніторингу.

Окремим напрямом сучасних досліджень є перехід від суто нормативної оцінки якості повітря до ризик-орієнтованих моделей, які враховують просторові особливості забруднення, щільність населення та чутливість територій. Це особливо актуально в умовах воєнних дій, коли екологічні процеси набувають високої динамічності та нерівномірності у просторі.

Таким чином, сучасні підходи до моніторингу атмосферного повітря характеризуються комплексністю, використанням багатоджерельних даних та активним застосуванням геоінформаційних технологій, що створює передумови для удосконалення методів оцінки рівня забруднення атмосфери.

1.2 Методи ГІС-аналізу в екологічних дослідженнях

Геоінформаційні системи є ефективним інструментом для аналізу екологічних процесів, що мають виражену просторову складову. У екологічних дослідженнях ГІС дозволяють інтегрувати різномірні дані, здійснювати просторову інтерполяцію, аналіз щільності, зонування та моделювання.

Особливе значення для оцінки забруднення атмосфери мають методи просторової інтерполяції, такі як IDW, Kriging та сплайн-інтерполяція, які дозволяють формувати безперервні поверхні розподілу концентрацій забруднювачів. Кластерний аналіз у середовищі ГІС дає змогу виділяти зони з подібними характеристиками екологічного навантаження, що є важливим для визначення порогових значень.

Для спеціальності «Геодезія та землеустрій» застосування ГІС-аналізу є ключовим елементом просторового дослідження, оскільки дозволяє поєднувати геодезичні дані, результати дистанційного зондування та статистичні показники в єдиній координатній системі.

Одним із базових методів ГІС-аналізу є просторове накладання, яке використовується для поєднання різних інформаційних шарів, таких як джерела забруднення, метеорологічні умови, рельєф місцевості та щільність населення.

Такий підхід дозволяє виявляти закономірності формування зон підвищеного екологічного ризику.

Важливе місце у ГІС-дослідженнях займають методи просторової інтерполяції, які дозволяють відновлювати безперервні поверхні забруднення на основі дискретних спостережень. Найпоширенішими є методи зворотних зважених відстаней (IDW) та геостатистичні методи, зокрема кригінг. Використання цих методів дає змогу отримувати картографічні моделі розподілу забруднювальних речовин із заданою точністю.

Просторово-статистичні методи ГІС-аналізу, такі як автокореляційний аналіз, індекси Морена та Гетіса-Орда, дозволяють оцінювати ступінь просторової впорядкованості забруднення та виявляти кластери високих і низьких значень. Кластерний аналіз у ГІС застосовується для типізації територій за рівнем екологічного навантаження, що є важливою передумовою порогової оцінки.

Окрему групу методів становлять засоби просторового моделювання, які дозволяють враховувати вплив метеорологічних факторів, рельєфу та характеру землекористування на поширення забруднювальних речовин. У поєднанні з ГІС такі моделі забезпечують комплексний підхід до аналізу екологічних процесів.

Таким чином, методи ГІС-аналізу створюють методологічну основу для дослідження просторової структури забруднення атмосферного повітря та формування науково обґрунтованих рішень у сфері екологічного моніторингу.

1.3 Особливості оцінки забруднення атмосфери в умовах воєнних дій

Оцінка забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій характеризується підвищеною складністю та невизначеністю. Джерела забруднення мають нерегулярний і часто неконтрольований характер, а доступ до зон активних бойових дій є обмеженим або неможливим.

Воєнні чинники зумовлюють різке зростання концентрацій аерозольних часток, продуктів горіння та токсичних сполук, що потребує застосування

адаптивних методів оцінки. У таких умовах ГС-аналіз дозволяє компенсувати дефіцит наземних даних за рахунок використання супутникових спостережень і просторово-статистичних моделей.

Таким чином, у воєнний період особливої актуальності набуває визначення порогових значень забруднення атмосфери не лише на основі нормативних показників, а й з урахуванням просторового розподілу, інтенсивності воєнного впливу та потенційних екологічних ризиків.

До основних джерел забруднення атмосфери під час війни належать пожежі на промислових і цивільних об'єктах, вибухи боєприпасів, згоряння пального, руйнування будівельних матеріалів та складів небезпечних речовин. Ці процеси призводять до викидів великої кількості твердих часток, токсичних газів та вторинних аерозолів, які можуть переноситися на значні відстані.

Ще однією характерною особливістю є порушення функціонування мереж наземного моніторингу. У зоні бойових дій багато постів спостереження стають недоступними або припиняють роботу, що створює інформаційні прогалини у даних. У таких умовах зростає значення супутникових спостережень та методів просторового моделювання, які дозволяють частково компенсувати нестачу наземних вимірювань.

Важливим аспектом оцінки забруднення атмосфери в умовах війни є необхідність адаптації порогових значень. Стандартні нормативи якості повітря, як правило, не враховують короточасні, але інтенсивні викиди, характерні для бойових дій. Тому доцільним є використання відносних та статистичних порогів, що базуються на аналізі просторового розподілу концентрацій забруднювачів.

Геоінформаційний підхід дозволяє інтегрувати інформацію про інтенсивність воєнних дій, джерела забруднення та метеорологічні умови, що є основою для формування адаптивних моделей оцінки екологічного стану. Це створює наукові передумови для розроблення методик оперативної оцінки ризиків та підтримки прийняття управлінських рішень.

Отже, оцінка забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій потребує використання комплексних геоінформаційних методів, адаптивних порогових підходів та просторово-орієнтованих моделей аналізу.

1.4 Вплив воєнних дій на формування екологічних загроз та забруднення атмосферного повітря

Воєнні дії є одним із найбільш потужних факторів антропогенного впливу на навколишнє середовище, що зумовлює комплексні загрози як для екосистем, так і для здоров'я населення. З початком повномасштабної збройної агресії проти України масштаби екологічних порушень набули безпрецедентного характеру, що проявляється у деградації повітряного басейну, забрудненні водних об'єктів і ґрунтів, а також у порушенні функціонування природних і антропогенних ландшафтів.

У перші місяці воєнних дій Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України було впроваджено цифрові інструменти збору інформації про екологічні злочини, зокрема мобільні додатки для фіксації фактів шкоди довкіллю. Станом на середину 2022 року було зареєстровано понад дві тисячі таких випадків. Водночас значну роль у фіксації екологічних порушень відіграють супутникові дані, що надаються Національним космічним агентством України, NASA та Європейським космічним агентством, які дозволяють здійснювати дистанційний моніторинг територій, недоступних для наземних інспекцій через активні бойові дії.

Одним із найбільш поширених наслідків війни є масові пожежі, що виникають унаслідок артилерійських обстрілів, ракетних ударів і вибухів боєприпасів. Горіння лісових масивів, промислових об'єктів, нафтобаз та цивільної інфраструктури супроводжується значними викидами токсичних речовин в атмосферу, що формує локальні та регіональні зони екологічного ризику.

Особливу небезпеку становлять аварійні викиди хімічних речовин унаслідок пошкодження промислових і складських об'єктів. Зафіксовані випадки вивільнення азотної кислоти, аміаку та інших токсичних сполук характеризуються високим ризиком гострих уражень органів дихання, зору та серцево-судинної системи. В умовах активних бойових дій оцінка впливу таких

викидів на населення є ускладненою, однак потенційні наслідки можуть мати як короткостроковий, так і довготривалий характер.

Основні леткі токсичні речовини, що утворюються під час пожеж об'єктів інфраструктури, а також їхній вплив на організм людини наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Концентрація летких токсичних речовин та їх вплив

Назва та хімічна формула	Опис впливу	Концентрація	Симптоми
Оксид вуглецю, чадний газ, CO	В результаті з'єднання з гемоглобіном крові утворюється неактивний комплекс - карбоксигемоглобін, що викликає порушення доставки кисню до тканин організму. Виділяється при горінні полімерних матеріалів.	0,2-1% про.	Загибель людини за період від 3 до 60 хв.
Діоксид азоту, NO ₂	При попаданні в кров утворюються нітроти та нітрати, які переводять оксигемоглобін у метгемоглобін, що викликає кисневу недостатність організму, обумовлену ураженням дихальних шляхів. Передбачається, що при пожежах у житлових будинках відсутні умови, необхідні для інтенсивного горіння. Однак відомий випадок масової загибелі людей у клінічній лікарні через горіння рентгенівської плівки.	510-760 мг/м ³ 950 мг/м ³	При вдиханні протягом 5 хв розвивається бронхопневмонія Набряк легенів

Сірчистий ангідрид (діоксид сірки, сірчистий газ, SO ₂)	На вологій поверхні слизових оболонок послідовно перетворюються на сірчисту та сірчану кислоту. Викликає кашель, носові кровотечі, спазм бронхів, порушує обмінні процеси, сприяє утворенню метгемоглобіну в крові, діє на кровотворні органи. Виділяється при горінні вовни, повсті, гуми та ін.	250-500 мг/м ³	Небезпечна концентрація Смертельна концентрація при дії протягом кількох хвилин.
		1500-2000 мг/м ³	

20

Нормативні значення гранично допустимих концентрацій (ГДК) основних забруднювальних речовин в атмосферному повітрі наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Нормативи забруднення атмосферного повітря

№	Речовина	Клас небезпеки	ПДК МР, мг/м ³	ПДК СС, мг/м ³
1	Оксид вуглецю	4	5	3
2	Діоксид азоту	2	0,2	0,04
3	Діоксид сірки	3	0,5	0,05

де ПДК МР – гранично допустима максимальна разова концентрація хімічної речовини у повітрі населених місць, мг/м³. Ця концентрація при вдиханні протягом 20-30 хв не повинна викликати рефлекторні реакції в організмі людини.

ПДК СС – гранично допустима середньодобова концентрація хімічної речовини у повітрі населених місць, мг/м³. Ця концентрація не повинна чинити на людину прямого чи непрямого шкідливого впливу при невизначено довгому (роки) вдиханні.

Зазначені нормативи використовуються як базові орієнтири для подальшого визначення порогових значень рівнів забруднення в геоінформаційних моделях.

Оцінка загальної екотоксичності забруднення, спричиненого воєнними діями, є складним науковим завданням через багатокomпонентний склад викидів

і значну просторово-часову варіабельність. У наукових дослідженнях зазначається, що токсичність таких викидів залежить від типу боєприпасів, характеру об'єкта ураження, метеорологічних умов та методів оцінки.

Навмисні або випадкові ураження нафтових, енергетичних і промислових об'єктів можуть призводити до масштабного забруднення повітря, ґрунтів і вод, а в окремих випадках – до транскордонного переносу забруднювальних речовин. Значну екологічну небезпеку становлять залишки військової техніки, боєприпасів, мін і металевих брухту, які з часом призводять до накопичення важких металів та токсичних сполук у природних середовищах.

Продукти горіння та руйнування матеріалів здатні переходити у водне середовище внаслідок процесів вилуговування. Дощові та талі води сприяють міграції важких металів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів та інших токсикантів у ґрунти, поверхневі й підземні води. Особливу увагу в дослідженнях приділяють вилуговуванню цинку та органічних сполук, що можуть зберігати токсичні властивості протягом тривалого часу.

Неконтрольоване згоряння об'єктів цивільної інфраструктури супроводжується утворенням широкого спектра забруднювальних речовин, склад яких залежить від типу матеріалів, температури горіння та умов навколишнього середовища. Основні компоненти диму наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Склад диму при згорянні об'єктів цивільної інфраструктури

Складовий елемент	Утворення диму (г/кг матеріалу, що горить)
Вуглекислий газ	626
Чадний газ	42
Оксид азоту	0,75
Окис азоту	1,6
Двоокис сірки	4
Синильна кислота	0,6
Соляна кислота	2
Пил	20

Метали (всього) в тому числі алюмінію та цинку >99%	22,74
Поліциклічні ароматичні вуглеводні (всього)	0,093
Поліхлоровані дифеніли (всього)	$2,16 \times 10^{-5}$
Діоксини/фурани (всього)	$1,9 \times 10^{-7}$

Забруднення атмосферного повітря внаслідок пожеж призводить до вторинного забруднення ґрунтів і вод через процеси атмосферного випадання та вимивання, що зумовлює комплексний характер екологічної шкоди.

Продукти горіння та вибухів можуть проникати у водні об'єкти як безпосередньо, так і через інфільтрацію в ґрунт. Забруднення ґрунтів має як миттєвий, так і відкладений характер і може зберігатися протягом десятиліть, особливо на замінованих і техногенно порушених територіях.

Таким чином, воєнні дії формують багаторівневий комплекс екологічних загроз, які безпосередньо впливають на стан атмосферного повітря та потребують застосування сучасних методів геоінформаційного аналізу для їх кількісної оцінки та просторового моделювання.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

2.1 Вихідні дані та джерела інформації для проведення дослідження

Для виконання просторового аналізу рівня забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій було сформовано комплексну базу вихідних даних, яка включає інформацію різного походження, просторової роздільної здатності та часової репрезентативності. Такий підхід дозволяє забезпечити комплексність оцінювання та підвищити достовірність отриманих результатів.

Основними джерелами даних у дослідженні стали:

- результати наземних спостережень за якістю атмосферного повітря, отримані з відкритих екологічних інформаційних ресурсів та мереж моніторингу;
- супутникові дані дистанційного зондування Землі, зокрема продукти супутників серії Sentinel та MODIS, що містять інформацію про концентрації аерозольних часток і газоподібних забруднювачів;
- картографічні матеріали, включаючи цифрові карти адміністративно-територіального устрою, транспортної мережі, промислових зон та населених пунктів;
- допоміжні просторові дані, зокрема цифрові моделі рельєфу та дані про метеорологічні умови.

Усі просторові дані були приведені до єдиної геодезичної основи та координатної системи, що забезпечує коректність геоінформаційного аналізу. Особлива увага приділялася перевірці повноти та узгодженості даних, оскільки в умовах воєнних дій інформація може мати прогалини або нерівномірне просторове покриття.

Для подальшого аналізу обрано часові інтервали, що відповідають періодам підвищеної воєнної активності, що дозволило оцінити вплив воєнних

чинників на рівень забруднення атмосферного повітря.

2.2 Методика геоінформаційного та просторово-статистичного аналізу забруднення атмосферного повітря

Методика дослідження базується на поєднанні інструментів геоінформаційного аналізу та просторово-статистичних методів, що є характерним для сучасних прикладних досліджень у галузі геодезії та геоінформатики.

На першому етапі було здійснено попередню обробку вихідних даних, яка включала:

- геоприв'язку та векторизацію окремих інформаційних шарів;
- фільтрацію аномальних значень;
- узгодження часових зрізів для різних типів даних.

Другий етап передбачав виконання просторової інтерполяції показників забруднення атмосферного повітря. Для цього застосовувалися методи зворотного зважування відстаней (IDW) та геостатистичні методи, зокрема крігінг. Обрані методи дозволили сформувані безперервні поверхні розподілу концентрацій забруднювальних речовин на досліджуваній території.

На третьому етапі було реалізовано просторово-статистичний аналіз, який включав:

- аналіз щільності забруднення;
- визначення зон концентрації підвищених значень;
- оцінку просторової автокореляції.

Для ідентифікації територій із подібними характеристиками екологічного навантаження застосовано кластерний аналіз. Кластеризація дозволила поділити досліджувану територію на групи зон з різним рівнем забруднення атмосфери, що стало основою для подальшого визначення порогових значень.

Завершальним етапом методики став пороговий аналіз, спрямований на встановлення критичних значень концентрацій забруднювачів, які відокремлюють допустимий, підвищений та небезпечний рівні екологічного

навантаження.

Основні принципи методики:

1. **Багатошаровий підхід:** використання різних джерел даних (супутникові знімки, наземні станції, екологічні моніторингові дані).

2. **Просторова статистика:** застосування методів інтерполяції та кластеризації для виявлення закономірностей і аномалій.

3. **Порогова оцінка:** визначення критичних концентрацій забруднювачів, які відокремлюють допустимий, підвищений та небезпечний рівні забруднення.

Методика передбачає чотири основні етапи: підготовка даних, просторове моделювання, статистичний аналіз і визначення порогів.

На підготовчому етапі здійснюється підготовка даних для інтеграції у ГІС та забезпечення їхньої наукової достовірності:

1. **Геоприв'язка та векторизація**

- Переведення растрових супутникових знімків у векторні шари.
- Геоприв'язка базується на координатній системі WGS-84 або місцевих державних геодезичних мережах.

2. **Фільтрація аномальних значень**

- Використовується статистичний критерій $\pm 2\sigma$ для виключення екстремальних даних.
- Забезпечує виключення результатів, які не відображають реальний стан атмосферного повітря (наприклад, техногенні аварії, помилки сенсорів).

3. **Узгодження часових зрізів**

- Дані з різних джерел мають різну частоту (щогодини, щодня, щомісяця).
- Використовується лінійна або сплайнова інтерполяція для синхронізації часових рядів.

Для побудови безперервних поверхонь концентрацій забруднювачів застосовуються кілька методів:

1. Метод зворотного зважування відстаней (IDW)

IDW базується на принципі: ближчі точки мають більшу вагу при обчисленні значення у заданій точці.

Переваги: простота реалізації, швидкість розрахунків.

Недоліки: не враховує автокореляції, чутливий до нерівномірного розподілу станцій.

2. Геостатистичні методи (крігінг)

Крігінг враховує просторову автокореляцію та дозволяє оцінити похибку прогнозу.

Переваги: точна інтерполяція, оцінка невизначеності.

Недоліки: складність обчислень, потребує великого обсягу даних.

В таблиці 2.1 показано порівняння методів.

Таблиця 2.1 – Порівняння методів просторово-статистичного аналізу забруднення атмосферного повітря

Метод	Переваги	Недоліки	Рекомендації для застосування
IDW	Простий, швидкий	Не враховує просторову автокореляцію	Малонаселені мережі станцій
Крігінг	Висока точність, оцінка похибки	Висока обчислювальна складність	Щільна мережа станцій
Сплайн	Гладкі поверхні	Може згладжувати аномалії	Моделювання великих територій

3. Просторово-статистичний аналіз

Цей етап включає:

1. Аналіз щільності забруднення – визначення концентрацій у кожній геопросторовій одиниці.

2. Визначення зон концентрації підвищених значень – локалізація "гарячих точок".

3. Оцінка просторової автокореляції – за допомогою індексу Морена:

4. Кластеризація території

Для поділу території на зони із різним рівнем забруднення застосовується кластерний аналіз.

Ієрархічна кластеризація – формує дендрограми для поділу території на кластери різного рівня подібності.

Приклад умовної таблиці кластеризації показаний в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – приклад кластеризації забруднення атмосферного повітря

Кластер	Середня концентрація CO, мг/м³	Кількість точок	Рівень забруднення
1	0,05	25	Низький
2	0,12	18	Підвищений
3	0,35	12	Високий

5. Пороговий аналіз

- Встановлення критичних значень концентрацій на основі нормативів ГДК.
- Поділ території на три зони: допустиму, підвищену та небезпечну.

Приклади використання методики в Україні під час війни

1. Моніторинг викидів з промислових об'єктів після обстрілів.
2. Виявлення зон підвищеної концентрації чадного газу та азотних сполук у містах, що постраждали від бойових дій.
3. Визначення зон ризику для мешканців та екосистем навколо місць знищених паливно-енергетичних об'єктів.
4. Інтеграція супутникових даних NASA та ESA з локальними наземними станціями для оцінки шкоди повітряному середовищу.

2.3 Результати просторового аналізу розподілу забруднення атмосферного повітря

У результаті виконання геоінформаційного аналізу було отримано серію тематичних карт, що відображають просторово-часовий розподіл показників

забруднення атмосферного повітря. Аналіз картографічних матеріалів свідчить про наявність вираженої просторової неоднорідності рівнів забруднення.

Найвищі концентрації забруднювальних речовин зафіксовано в районах із поєднанням інтенсивного антропогенного навантаження та воєнного впливу. До таких територій належать промислові зони, транспортні вузли, а також райони активних бойових дій. У той же час периферійні та сільські території характеризуються відносно нижчими значеннями показників забруднення.

Просторово-статистичний аналіз виявив чітку кореляцію між щільністю джерел забруднення та концентрацією атмосферних домішок. Встановлено, що воєнні чинники суттєво посилюють локальні піки забруднення, які не завжди відображаються у середніх регіональних показниках.

Отримані результати підтверджують доцільність використання ГІС-аналізу для виявлення локальних екологічних ризиків та оцінки впливу воєнних дій на стан атмосферного повітря.

2.4 Кластеризація територій за рівнем забруднення атмосфери

Застосування методів кластерного аналізу дозволило здійснити просторове групування територій за сукупністю показників забруднення атмосферного повітря. У результаті кластеризації було виділено декілька типових кластерів, що відрізняються рівнем і характером екологічного навантаження.

Перший кластер об'єднує території з відносно низьким рівнем забруднення, для яких характерна мінімальна концентрація джерел антропогенного та воєнного впливу. Другий кластер представлений зонами із середнім рівнем забруднення, де спостерігається поєднання фонового антропогенного навантаження та періодичних воєнних впливів.

Найбільш проблемним є третій кластер, до якого належать території з високим рівнем забруднення атмосферного повітря. Для цих зон характерні стабільно підвищені концентрації забруднювачів, що зумовлені активними бойовими діями, пожежами та руйнуванням інфраструктурних об'єктів.

Кластерний підхід дозволив не лише узагальнити результати аналізу, а й

створити основу для визначення диференційованих порогових значень екологічної небезпеки.

На основі результатів просторового аналізу та кластеризації територій було здійснено визначення порогових значень рівнів забруднення атмосферного повітря. Порогові значення визначалися як статистично обґрунтовані межі між кластерами з різним рівнем екологічного навантаження.

У результаті аналізу виділено три основні рівні забруднення:

- допустимий рівень, що відповідає фоновим або слабо вираженим антропогенним впливам;
- підвищений рівень, який свідчить про наявність локальних джерел забруднення та потенційні екологічні ризики;
- небезпечний рівень, характерний для територій з інтенсивним воєнним впливом та високими концентраціями забруднювачів.

Отримані порогові значення дозволяють адаптувати традиційні нормативні підходи до умов воєнного часу та враховувати просторову специфіку розподілу забруднення атмосферного повітря.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПОРОГОВИХ ЗНАЧЕНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ГІС- АНАЛІЗУ ПІД ЧАС ВІЙНИ В УКРАЇНІ

3.1 Просторові особливості забруднення атмосферного повітря на території України в умовах воєнних дій

Воєнні дії на території України спричинили суттєві зміни у просторовій структурі забруднення атмосферного повітря. На відміну від довоєнного періоду, коли основними осередками забруднення виступали великі промислові агломерації та транспортні коридори, у воєнний час формування зон підвищеного забруднення має більш мозаїчний та динамічний характер.

За результатами геоінформаційного аналізу встановлено, що найбільш інтенсивні осередки забруднення атмосфери приурочені до:

- районів активних або нещодавніх бойових дій;
- територій масових пожеж, спричинених обстрілами;
- зон руйнування промислових, енергетичних та інфраструктурних об'єктів;
- вузлів концентрації військової техніки та логістичних маршрутів.

Просторовий аналіз свідчить, що забруднення атмосферного повітря поширюється не лише локально, а й формує вторинні зони впливу, обумовлені перенесенням аерозольних часток повітряними потоками. Це особливо характерно для східних та південних регіонів України, де поєднуються воєнні чинники та традиційне промислове навантаження.

У центральних та західних регіонах країни загальний рівень забруднення є нижчим, проте просторовий аналіз виявляє локальні піки, пов'язані з ракетними ударами, пожежами та роботою резервних енергетичних потужностей. Таким чином, в умовах війни атмосферне забруднення в Україні має виражений просторово-часовий характер, що зумовлює необхідність застосування

адаптивних порогових критеріїв оцінки.

3.2 Визначення порогових значень рівнів забруднення атмосферного повітря

На основі результатів кластерного та просторово-статистичного аналізу, отриманих у другому розділі, було визначено порогові значення рівнів забруднення атмосферного повітря для умов воєнного часу. Визначення порогів здійснювалося з урахуванням статистичного розподілу показників забруднення, просторової структури кластерів та інтенсивності воєнного впливу.

У межах дослідження запропоновано поділ рівнів забруднення атмосфери на три основні категорії:

1. Допустимий рівень забруднення. Характеризується концентраціями забруднювальних речовин, що відповідають фоновим або слабо вираженим антропогенним впливам. Для цих територій не зафіксовано систематичного воєнного навантаження, а просторові коливання показників мають випадковий характер.

2. Підвищений рівень забруднення. Визначається як перехідна зона між фоновим станом та критичним навантаженням. Для таких територій характерні локальні перевищення концентрацій забруднювачів, обумовлені поодинокими воєнними подіями або сумарним впливом антропогенних і воєнних факторів.

3. небезпечний рівень забруднення. Формується в районах активних бойових дій та масштабних техногенних руйнувань. Для цих зон характерні стійко підвищені концентрації аерозольних часток та газоподібних забруднювачів, що створюють загрозу для здоров'я населення та функціонування екосистем.

Запропоновані порогові значення мають не нормативний, а аналітично-оцінювальний характер, що дозволяє використовувати їх для оперативного екологічного аналізу в умовах обмеженої доступності даних.

3.3 Картографічне моделювання зон екологічної небезпеки

З метою наочного представлення результатів дослідження було виконано картографічне моделювання зон екологічної небезпеки на території України. У середовищі ГІС сформовано серію тематичних карт, які відображають:

- просторовий розподіл концентрацій основних забруднювачів;
- кластеризацію територій за рівнем забруднення;
- зони перевищення визначених порогових значень.

Картографічні моделі дозволили ідентифікувати території з різним рівнем екологічного ризику та оцінити масштаби потенційного впливу воєнних дій на стан атмосферного повітря. Особливу увагу приділено прикордонним зонам між кластерами, які характеризуються підвищеною динамічністю показників забруднення.

Результати картографічного аналізу свідчать про доцільність використання ГІС-моделей як інструменту підтримки прийняття управлінських рішень у сфері екологічної безпеки та просторового планування.

3.4 Практичні рекомендації щодо використання результатів дослідження

На основі проведеного дослідження сформульовано практичні рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності моніторингу атмосферного повітря в умовах воєнних дій:

1. Інтеграція ГІС-аналізу в системи екологічного моніторингу. Рекомендується впровадження геоінформаційних платформ для об'єднання наземних і супутникових даних з метою оперативної оцінки екологічної ситуації.
2. Використання порогових значень для оперативної оцінки ризиків. Запропоновані порогові рівні можуть бути використані для швидкої ідентифікації територій з підвищеним рівнем екологічної небезпеки.

3. Пріоритетизація заходів екологічного реагування. Картографічні результати доцільно застосовувати для визначення пріоритетних зон проведення екологічного контролю та відновлювальних заходів.

4. Застосування результатів у просторовому плануванні. Отримані матеріали можуть бути використані при розробленні схем територіального планування та оцінці екологічних обмежень землекористування.

РОЗДІЛ 4

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНТЕРАКТИВНІ МЕТОДИ ГІС-АНАЛІЗУ ПІД ЧАС ВІЙНИ В УКРАЇНІ

4.1 Роль програмного забезпечення ГІС у дослідженнях забруднення атмосфери в умовах воєнних дій

В умовах воєнних дій роль програмного забезпечення геоінформаційних систем (ГІС) у дослідженнях забруднення атмосферного повітря суттєво зростає. Повномасштабна війна в Україні призвела до руйнування значної частини промислових об'єктів, енергетичної інфраструктури, транспортних вузлів, а також до масових пожеж, вибухів і витоків небезпечних речовин. У таких умовах традиційні методи екологічного моніторингу, що базуються виключно на стаціонарних пунктах спостереження, виявилися недостатніми або взагалі недоступними через фізичне знищення обладнання, окупацію територій чи загрозу безпеці персоналу.

Програмне забезпечення ГІС забезпечує інтеграцію різноманітних джерел просторової та атрибутивної інформації, що є критично важливим для комплексної оцінки забруднення атмосфери під час війни. До таких джерел належать дані дистанційного зондування Землі, результати наземних вимірювань, інформація з відкритих екологічних платформ, метеорологічні спостереження, а також оперативні відомості про місця бойових дій, пожеж, обстрілів і техногенних аварій. ГІС дозволяють поєднати ці дані в єдиному інформаційному середовищі та забезпечити їх просторово-часовий аналіз.

Однією з ключових функцій ГІС-програмного забезпечення в умовах воєнних дій є візуалізація просторового розподілу забруднюючих речовин. Побудова тематичних карт концентрацій основних забруднювачів атмосферного повітря (оксидів азоту, діоксиду сірки, оксиду вуглецю, твердих часток $PM_{2.5}$ та PM_{10}) дозволяє наочно оцінити масштаби та локалізацію екологічних загроз. Особливо важливим є відображення зон підвищеного ризику для здоров'я

населення в районах активних бойових дій, промислових агломерацій і великих міст.

ГІС-програмне забезпечення відіграє важливу роль у компенсації просторових прогалин у даних моніторингу. У багатьох регіонах України під час війни відсутні або не функціонують стаціонарні пости контролю якості повітря. Застосування методів просторової інтерполяції в середовищі ГІС дозволяє отримати наближені оцінки рівнів забруднення на основі наявних точкових спостережень. Це забезпечує формування безперервних поверхонь забруднення та створює передумови для подальшого аналізу й прогнозування.

Важливою перевагою ГІС є можливість оперативного аналізу динаміки забруднення атмосфери в часі. Використання часових рядів супутникових знімків і регулярних оновлень даних дозволяє відстежувати зміни екологічної ситуації, пов'язані з інтенсивністю бойових дій, масштабами пожеж або відновленням інфраструктури. Такий підхід є особливо актуальним для оцінки короткострокових і довгострокових наслідків війни для довкілля.

Крім аналітичних функцій, програмне забезпечення ГІС відіграє важливу роль у підтримці прийняття управлінських рішень. Результати ГІС-аналізу можуть бути використані органами державної влади, екологічними службами, медичними установами та гуманітарними організаціями для планування заходів щодо зменшення негативного впливу забрудненого повітря на населення, визначення пріоритетних територій для екологічного моніторингу та розробки стратегій післявоєнного відновлення.

Таким чином, програмне забезпечення геоінформаційних систем є невід'ємним елементом сучасних досліджень забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій. Його використання дозволяє забезпечити комплексний, просторово орієнтований підхід до аналізу екологічних загроз, підвищити достовірність оцінок та ефективність управлінських рішень навіть за умов обмеженості вихідних даних і підвищених ризиків для традиційних методів спостереження.

4.2 Класифікація програмного забезпечення ГІС, що використовується під час війни

В умовах воєнних дій програмне забезпечення геоінформаційних систем набуває особливого значення як інструмент оперативного аналізу, моніторингу та прогнозування екологічної ситуації. Для ефективного застосування ГІС у дослідженнях забруднення атмосферного повітря доцільно здійснити класифікацію програмного забезпечення за функціональним призначенням, рівнем доступності, типами даних, що обробляються, а також за можливістю використання в умовах обмежених ресурсів і підвищених ризиків, характерних для воєнного часу.

Насамперед ГІС-програмне забезпечення можна класифікувати за рівнем доступності на комерційне та відкрите (open-source). Комерційні програмні продукти, такі як ArcGIS Pro, ArcGIS Online, ERDAS IMAGINE, ENVI, мають потужний аналітичний інструментарій, інтегровані модулі просторової статистики, засоби автоматизованої обробки супутникових знімків і розвинені можливості візуалізації. Проте в умовах війни їх використання часто обмежується високою вартістю ліцензій, залежністю від стабільного інтернет-з'єднання та серверної інфраструктури.

Натомість відкрите ГІС-програмне забезпечення, зокрема QGIS, GRASS GIS, SAGA GIS, набуло широкого застосування в Україні під час війни. Його перевагою є безкоштовний доступ, гнучкість налаштувань, підтримка численних форматів даних та можливість роботи в автономному режимі. Саме ці програмні продукти використовуються в даній роботі для реалізації методів геоінформаційного та просторово-статистичного аналізу, описаних у розділі 2, що забезпечує методологічну узгодженість дослідження.

За функціональним призначенням програмне забезпечення ГІС, що застосовується під час війни, доцільно поділяти на декілька груп. Перша група - це системи збору та інтеграції просторових даних. До них належать програмні засоби для імпорту супутникових знімків (Sentinel Hub, Copernicus Open Access Hub), обробки даних дистанційного зондування та геокодування інформації з

відкритих джерел. Вони забезпечують формування вихідної бази даних, яка використовується для подальших аналітичних процедур.

Друга група – аналітичні ГІС-платформи, призначені для просторового аналізу, інтерполяції, кластеризації та моделювання. Саме в цих системах реалізуються методи IDW, крігінгу, просторової автокореляції та кластерного аналізу, що докладно розглянуті у розділі 2. Застосування таких інструментів дозволяє компенсувати відсутність повноцінної мережі спостережень і отримувати оцінки рівнів забруднення атмосферного повітря навіть на тимчасово окупованих або важкодоступних територіях.

Третя група – це візуалізаційні та картографічні системи, орієнтовані на представлення результатів аналізу у вигляді тематичних карт, діаграм і інтерактивних панелей. В умовах війни такі інструменти мають особливе значення для комунікації результатів досліджень з органами державної влади, екологічними службами та громадськістю. Вони дозволяють швидко і наочно відобразити зони підвищеного ризику, що безпосередньо пов'язано з практичним значенням роботи.

Окрему категорію становлять веб-ГІС та хмарні платформи, які забезпечують інтерактивний доступ до даних у режимі реального часу. Прикладами є сервіси моніторингу якості повітря, інтегровані з ГІС, а також онлайн-платформи аналізу супутникових даних. У контексті цієї роботи такі системи розглядаються як допоміжні джерела інформації, дані з яких інтегруються в настільні ГІС для подальшого аналізу.

Класифікація ГІС-програмного забезпечення має важливе методичне значення для даного дослідження, оскільки вона визначає вибір інструментів, які найбільш повно відповідають завданням оцінки забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій. Використання відкритих і гнучких ГІС-платформ забезпечує узгодженість з методикою, викладеною в розділі 2, та створює основу для практичної реалізації результатів, що буде продемонстровано у наступних підрозділах розділу 4.

Таким чином, класифікація програмного забезпечення ГІС дозволяє систематизувати інструментарій дослідження, обґрунтувати вибір конкретних

програмних засобів та забезпечити логічний перехід від теоретико-методологічних положень до практичного застосування ГІС-аналізу в умовах війни в Україні.

4.3 Настільні ГІС-платформи та їх застосування

QGIS є однією з найпоширеніших відкритих геоінформаційних систем, яка активно використовується в Україні, зокрема в умовах обмеженого доступу до комерційного програмного забезпечення. Основними перевагами QGIS є безкоштовність, відкритий код, підтримка численних форматів просторових даних та можливість розширення функціоналу за допомогою плагінів.

У рамках оцінки забруднення атмосферного повітря під час війни QGIS використовується для:

- імпорту та візуалізації супутникових знімків Sentinel-2, Landsat, комерційних даних;
- геокодування пунктів моніторингу якості повітря;
- просторової інтерполяції концентрацій забруднювачів;
- побудови буферних зон навколо джерел забруднення;
- виконання кластерного аналізу;
- створення тематичних карт та аналітичних звітів.

Особливу роль відіграє **QGIS Processing Framework**, який дозволяє автоматизувати складні ланцюги аналізу та поєднувати інструменти різних ГІС-движків.

ArcGIS Pro та пов'язані з ним сервіси забезпечують високий рівень інтеграції просторових даних, аналітики та візуалізації. У воєнних умовах ArcGIS застосовується переважно в державних установах, наукових організаціях та міжнародних проєктах.

Сильними сторонами ArcGIS є:

- розвинуті геостатистичні модулі;
- інтеграція з веб-сервісами;
- створення інтерактивних карт і дашбордів;

- можливість роботи з великими обсягами даних.

Водночас доступність таких рішень в умовах війни є обмеженою, що підвищує значущість відкритих альтернатив.

4.4 Веб-ГІС та інтерактивні онлайн-платформи

Веб-геоінформаційні системи та інтерактивні онлайн-платформи відіграють дедалі важливішу роль у сучасних дослідженнях забруднення атмосферного повітря, особливо в умовах воєнних дій, коли оперативність отримання та поширення інформації має критичне значення. На відміну від настільних ГІС, веб-ГІС орієнтовані на роботу з динамічними потоками даних у режимі реального часу та забезпечують доступ до просторової інформації широкому колу користувачів — від науковців і фахівців органів влади до населення.

У межах даної магістерської роботи веб-ГІС розглядаються як інструмент первинного збору, оперативної візуалізації та попереднього аналізу даних про якість атмосферного повітря, які надалі інтегруються в настільні ГІС-платформи для поглибленого просторово-статистичного аналізу. Такий підхід забезпечує логічний зв'язок між інтерактивними онлайн-ресурсами та методикою визначення порогових значень забруднення, описаною у розділі 2.

Однією з найбільш поширених категорій веб-ГІС є платформи моніторингу якості повітря, що використовують як дані державних постів спостереження, так і інформацію з мереж громадського моніторингу. До таких ресурсів належать сервіси на основі індексу якості повітря (AQI, SAQI), які дозволяють відображати концентрації основних забруднювальних речовин у вигляді інтерактивних карт. У контексті цієї роботи такі платформи використовувалися для попередньої ідентифікації територій з підвищеним рівнем забруднення та вибору ділянок для подальшого детального аналізу в середовищі ГІС.

Важливою особливістю веб-ГІС у воєнних умовах є можливість оперативного оновлення даних. Під час бойових дій рівень забруднення атмосфери може різко змінюватися внаслідок пожеж, вибухів, руйнування

промислових і енергетичних об'єктів. Веб-платформи дозволяють фіксувати такі зміни практично в реальному часі, що є критично важливим для оцінки короткострокових екологічних ризиків та прийняття управлінських рішень.

Окрему групу веб-ГІС становлять платформи, що інтегрують дані дистанційного зондування Землі. Онлайн-сервіси, які надають доступ до супутникових знімків Sentinel, Landsat та інших місій, дозволяють візуально ідентифікувати осередки пожеж, зони руйнувань та потенційні джерела забруднення атмосфери. У даній роботі такі ресурси використовувалися для попереднього аналізу територій, де наземні пости спостереження були відсутні або недоступні через воєнну обстановку, що безпосередньо пов'язано з проблематикою розділу 3.

Інтерактивні веб-ГІС також забезпечують можливість накладання різних інформаційних шарів, зокрема адміністративних меж, транспортної інфраструктури, промислових зон та населених пунктів. Це дозволяє виконувати попередній просторовий аналіз впливу забруднення на населення та критичні об'єкти, а також формувати гіпотези для подальшої перевірки за допомогою настільних ГІС та просторово-статистичних методів.

У контексті методики, запропонованої в цій роботі, веб-ГІС виконують функцію інструмента попередньої класифікації територій за рівнем забруднення. Отримані з онлайн-платформ дані використовуються як вхідні параметри для побудови безперервних поверхонь концентрацій та подальшого визначення порогових значень за допомогою інтерполяційних і кластерних методів. Таким чином, веб-ГІС забезпечують інформаційне підґрунтя для реалізації повного циклу ГІС-аналізу.

Крім того, веб-ГІС мають важливе значення для комунікації результатів дослідження. Інтерактивні карти дозволяють наочно представити результати оцінки рівня забруднення атмосферного повітря та зонування територій за ступенем екологічної небезпеки. Це підвищує доступність наукових результатів для органів державної влади, місцевого самоврядування та громадськості, що є особливо актуальним в умовах війни.

Таким чином, веб-ГІС та інтерактивні онлайн-платформи є невід'ємним елементом сучасних досліджень забруднення атмосфери в Україні під час воєнних дій. Їх використання в поєднанні з настільними ГІС-платформами та просторово-статистичними методами забезпечує цілісність методологічного підходу, запропонованого в цій магістерській роботі, та підвищує практичну значущість отриманих результатів.

4.5 Інтерактивні методи ГІС-аналізу

Інтерактивність у ГІС полягає у можливості змінювати параметри аналізу та миттєво оцінювати результати. Під час інтерполяції (IDW, Kriging) користувач може:

- змінювати радіус впливу;
- коригувати кількість сусідніх точок;
- порівнювати результати різних методів.

Це дозволяє адаптувати модель до реальних умов війни, коли дані є фрагментарними.

Інтерактивні методи кластерного аналізу дозволяють оперативно змінювати критерії групування територій за рівнем забруднення та візуально оцінювати межі екологічного ризику. У QGIS це реалізується через модулі статистичного аналізу та спеціалізовані плагіни.

Інтерактивні дашборди дозволяють поєднувати карти, графіки та таблиці в єдиному інтерфейсі. У воєнних умовах такі інструменти є надзвичайно корисними для:

- органів місцевої влади;
- екологічних служб;
- медичних установ;
- гуманітарних організацій.

Інтерактивні методи геоінформаційного аналізу є важливим сучасним напрямом розвитку ГІС-технологій, що забезпечує активну взаємодію користувача з просторовими даними в режимі реального часу. В умовах воєнних

дій в Україні, коли екологічна обстановка змінюється динамічно, а доступ до стаціонарних джерел інформації часто обмежений, інтерактивні ГІС-інструменти набувають особливої актуальності. Вони дозволяють оперативно оновлювати, аналізувати та візуалізувати дані про стан атмосферного повітря, що є критично важливим для оцінки ризиків та прийняття управлінських рішень.

Інтерактивні методи ГІС-аналізу ґрунтуються на використанні програмних засобів, які підтримують динамічне масштабування карт, увімкнення та вимкнення інформаційних шарів, зміну параметрів візуалізації та миттєвий перерахунок аналітичних показників. У контексті цієї роботи такі методи використовуються для аналізу просторового розподілу забруднювальних речовин, виявлення осередків підвищеного забруднення та оцінки їх впливу на населені пункти і критичну інфраструктуру.

Одним з ключових інтерактивних інструментів є динамічне керування тематичними картами. Користувач має змогу змінювати класифікаційні шкали, порогові значення та кольорові градації, що дозволяє візуально оцінювати різні сценарії екологічного навантаження. У межах даної магістерської роботи цей підхід використовується для аналізу чутливості результатів до вибору порогових значень забруднення, що безпосередньо пов'язано з методикою, описаною у розділі 2.

Важливим аспектом інтерактивного ГІС-аналізу є можливість роботи з часовими рядами. Інтерактивні часові повзунки та анімаційні інструменти дозволяють відстежувати зміну рівнів забруднення атмосфери у часі, що особливо актуально під час активних бойових дій, пожеж або руйнування промислових об'єктів. Такий аналіз дає змогу виявляти пікові періоди забруднення, оцінювати тривалість негативного впливу та порівнювати різні часові інтервали.

Інтерактивні методи також широко застосовуються для просторової вибірки та запитів. За допомогою інструментів виділення користувач може оперативно визначати ділянки, де концентрації забруднювальних речовин перевищують встановлені порогові значення, а також аналізувати їх просторові взаємозв'язки з джерелами викидів, транспортною мережею та щільністю

населення. У межах цієї роботи такі інструменти використовуються для формування зон підвищеного екологічного ризику, що є основою для подальших рекомендацій.

Окрему групу інтерактивних методів становлять інструменти сценарного аналізу. Вони дозволяють моделювати зміни рівня забруднення за різних умов, наприклад, при зміні інтенсивності бойових дій, напрямку вітру або масштабів пожеж. Хоча такі сценарії часто мають умовний характер, їх використання сприяє кращому розумінню можливих наслідків та підвищує аналітичну цінність дослідження.

Інтерактивні ГІС-інструменти також відіграють важливу роль у комунікації результатів дослідження. Інтерактивні карти та панелі керування дозволяють представляти складні аналітичні результати у зрозумілій формі, що є важливим для взаємодії з органами влади, фахівцями з цивільного захисту та громадськістю. Це особливо актуально в умовах війни, коли своєчасне інформування населення про стан довкілля може мати безпосередній вплив на здоров'я та безпеку людей.

Таким чином, інтерактивні методи ГІС-аналізу є важливим доповненням до класичних підходів просторово-статистичного аналізу, застосованих у цій магістерській роботі. Їх використання дозволяє підвищити оперативність, гнучкість та наочність оцінки рівня забруднення атмосферного повітря, а також забезпечує тісний зв'язок між аналітичними розрахунками, картографічною візуалізацією та практичними рекомендаціями, сформульованими за результатами дослідження.

Автоматизація просторового аналізу забезпечує повторюваність результатів та мінімізацію людського фактору. У QGIS це реалізується через:

- моделі обробки (Model Builder);
- пакетну обробку;
- використання сценаріїв Python.

Автоматизовані алгоритми дозволяють регулярно оновлювати карти забруднення та оперативно реагувати на нові екологічні загрози.

4.6 Обмеження та перспективи розвитку ГІС-інструментів у воєнний період

Незважаючи на значний потенціал геоінформаційних систем у дослідженнях стану атмосферного повітря, їх застосування в умовах воєнних дій супроводжується низкою суттєвих обмежень. Ці обмеження мають як технічний, так і організаційний, інформаційний та безпековий характер, що безпосередньо впливає на повноту, точність і оперативність ГІС-аналізу.

Одним з ключових обмежень є дефіцит достовірних і безперервних вихідних даних. Унаслідок бойових дій значна частина стаціонарних постів моніторингу якості атмосферного повітря була зруйнована або тимчасово припинила роботу. Це призводить до фрагментарності спостережень і утворення «білих плям» на картах забруднення, що ускладнює просторову інтерполяцію та знижує надійність отриманих результатів. У межах цієї роботи зазначене обмеження частково компенсується використанням даних дистанційного зондування Землі та просторово-статистичних методів, однак повністю усунути його в умовах війни неможливо.

Важливим обмежувальним чинником є також обмежений доступ до високоточних супутникових знімків та спеціалізованих комерційних сервісів. Знімки надвисокого просторового розрізнення є надзвичайно ефективними для виявлення локальних джерел забруднення, таких як пожежі, вибухи або руйнування промислових об'єктів, однак їх висока вартість та обмеження доступу роблять регулярне використання таких даних проблематичним. У зв'язку з цим у роботі акцент зроблено на використанні відкритих супутникових даних та безкоштовних ГІС-платформ.

Окремою проблемою є питання безпеки та конфіденційності просторової інформації. У воєнний період поширення детальних геопросторових даних може створювати потенційні ризики, пов'язані з розкриттям чутливої інформації про інфраструктуру, промислові об'єкти або населені пункти. Це накладає обмеження на рівень деталізації картографічних матеріалів та обсяг відкритих даних, що використовуються для аналізу і публікації результатів.

Також слід зазначити методологічні обмеження ГІС-аналізу в умовах війни. Більшість просторових моделей і алгоритмів, зокрема методи інтерполяції та кластеризації, ґрунтуються на припущенні відносної стабільності процесів у часі. В умовах інтенсивних бойових дій ці припущення часто не виконуються, оскільки джерела забруднення можуть з'являтися раптово і мати короткочасний, але інтенсивний характер. Це потребує адаптації існуючих методик і підвищення ролі інтерактивного та сценарного аналізу, що було враховано в цій роботі.

Попри зазначені обмеження, перспективи розвитку ГІС-інструментів у воєнний період є значними. Одним із ключових напрямів є інтеграція різнорідних джерел даних, зокрема супутникових знімків, даних мобільних сенсорів, краудсорсингової інформації та відкритих екологічних платформ. Такий підхід дозволяє підвищити просторову і часову роздільну здатність аналізу та частково компенсувати втрати традиційних систем моніторингу.

Перспективним напрямом є також розвиток автоматизованих і напівавтоматизованих алгоритмів обробки просторових даних, зокрема з використанням елементів машинного навчання. Це дозволяє оперативно виявляти аномалії, пов'язані з різким погіршенням якості повітря, та формувати попереджувальні сигнали для відповідних служб. У контексті даної роботи такі підходи можуть бути використані для подальшого розвитку запропонованої методики оцінки забруднення атмосфери.

Важливою перспективою є розширення використання веб-ГІС та інтерактивних онлайн-платформ, які забезпечують доступ до результатів аналізу широкому колу користувачів. Це сприяє підвищенню прозорості екологічної інформації та формуванню обґрунтованих управлінських рішень навіть в умовах обмежених ресурсів.

Таким чином, обмеження застосування ГІС-інструментів у воєнний період мають об'єктивний характер, однак не знижують їх загальної цінності для екологічних досліджень. Навпаки, сучасні виклики стимулюють розвиток нових підходів, методів і програмних рішень, що робить ГІС-аналіз одним з ключових інструментів оцінки та управління станом атмосферного повітря в Україні в умовах війни та післявоєнного відновлення.

Незважаючи на значні можливості ГІС, існують обмеження, пов'язані з:

- недостатньою кількістю вхідних даних;
- впливом атмосферних умов;
- обмеженим доступом до високоточних знімків;
- похибками інтерпретації супутникової інформації.

Водночас розвиток відкритих даних, інтеграція штучного інтелекту та хмарних обчислень створюють перспективи для подальшого вдосконалення методів ГІС-аналізу в умовах війни.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ОЦІНКИ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС-АНАЛІЗУ, СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ТА МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

5.1 Наукова ідея, мета та концепція програмного рішення

В умовах повномасштабної війни на території України питання екологічної безпеки набувають особливої актуальності. Руйнування промислових об'єктів, обстріли енергетичної та транспортної інфраструктури, масштабні пожежі, а також підвищене навантаження на промислові підприємства оборонного значення призводять до різкого зростання ризиків забруднення атмосферного повітря. Традиційні наземні пости спостереження за станом атмосфери в таких умовах часто є недоступними, пошкодженими або не забезпечують достатнього просторового покриття.

У зв'язку з цим виникає потреба у використанні альтернативних методів оцінки рівня забруднення атмосферного повітря, які не залежать від наземної інфраструктури, мають широке просторове охоплення та дозволяють здійснювати аналіз у квазіоперативному режимі. Одним із таких підходів є інтеграція супутникових даних дистанційного зондування Землі з геоінформаційними системами та метеорологічною інформацією.

Метою даного програмного модуля є розроблення інструменту для оцінки та візуалізації рівнів атмосферного забруднення діоксидом азоту (NO_2) та діоксидом сірки (SO_2) з урахуванням просторового, вертикального та часового розподілу домішок у повітрі на основі супутникових даних Sentinel-5P та метеорологічного реаналізу ERA5.

Основна ідея програмного рішення полягає у поєднанні:

- фонових супутникових оцінок концентрацій газоподібних забруднювачів;

- оперативних метеорологічних даних про швидкість та напрямок вітру;
- математичних моделей вертикального розподілу та просторового розсіювання домішок;
- геоінформаційної візуалізації результатів у тривимірному та часовому вимірі.

Таким чином, створюється програмний інструмент, який дозволяє не лише оцінювати стан атмосферного повітря в окремий момент часу, але й аналізувати його зміну у просторі, по висоті та в динаміці, що є критично важливим у період воєнних дій.

5.2 Архітектура програмного модуля та обґрунтування вибору технологій

Розроблений програмний модуль реалізований мовою програмування Python, що обумовлено її широкими можливостями у сфері обробки просторових даних, наявністю спеціалізованих бібліотек для роботи з форматами NetCDF та KML, а також активним використанням у наукових і прикладних ГІС-дослідженнях.

Загальна структура програмного забезпечення

Архітектура програми має модульну структуру та складається з таких логічних блоків:

1. **Модуль завантаження супутникових даних** – забезпечує зчитування та первинну обробку продуктів Sentinel-5P.
2. **Модуль метеорологічного аналізу** – відповідає за зчитування даних ERA5 та розрахунок швидкості й напрямку вітру.
3. **Модуль просторово-вертикального моделювання** – реалізує математичні залежності розподілу концентрацій у просторі та по висоті.
4. **Модуль часової інтеграції** – формує часові зрізи та анімацію результатів.
5. **Модуль ГІС-візуалізації** – експортує результати у формат KML для перегляду в Google Earth.

Подібна структура забезпечує масштабованість програмного рішення та можливість подальшого розширення, зокрема шляхом підключення нових забруднювачів або альтернативних джерел метеоданих.

Обґрунтування вибору джерел даних

Супутник Sentinel-5P було обрано через його спеціалізацію на моніторингу атмосферних газів та високу просторову роздільну здатність. Реаналіз ERA5, у свою чергу, забезпечує стабільні та узгоджені метеорологічні дані з погодинною дискретністю, що є необхідним для формування часової анімації.

5.3 Методи обробки даних та математичні моделі

Обробка супутникових даних Sentinel-5P

Супутникові продукти Sentinel-5P постачаються у форматі NetCDF та містять дані у вигляді регулярних або квазірегулярних сіток. У межах програми здійснюється:

- відкриття NetCDF-файлів;
- вибір змінних, що відповідають концентраціям NO_2 та SO_2 ;
- просторове обмеження даних межами Дніпропетровської області;
- масштабування значень до умовних концентрацій, придатних для подальшого аналізу.

Отримані значення використовуються як фоновий рівень забруднення, який надалі модифікується з урахуванням атмосферної циркуляції.

Використання метеорологічних даних ERA5

Для врахування впливу вітру використано компоненти швидкості вітру u_{10} та v_{10} . На їх основі розраховується модуль швидкості та напрямок повітряних потоків. Швидкість вітру використовується як параметр, що впливає на ступінь розсіювання забруднювачів: зі зростанням швидкості вітру локальні концентрації зменшуються, а зона впливу розширюється.

Вертикальний розподіл домішок

Для моделювання вертикального профілю концентрацій застосовано експоненціальну модель, яка відображає зменшення концентрації з висотою.

Обрані висотні рівні (0, 100, 300, 500 м) відповідають приземному шару атмосфери та нижній тропосфері, де зосереджена основна маса забруднювачів.

5.4 Алгоритм роботи програмного модуля

Алгоритм роботи програми складається з таких етапів:

1. Ініціалізація параметрів області дослідження та висотних рівнів.
2. Завантаження супутникових даних Sentinel-5P для NO₂ та SO₂.
3. Просторове обмеження даних межами Дніпропетровської області.
4. Завантаження метеорологічних даних ERA5 та вибір часових зрізів.
5. Розрахунок швидкості та напрямку вітру для кожного часового кроку.
6. Моделювання вертикального та просторового розподілу концентрацій.
7. Формування часових шарів із використанням механізму TimeSpan.
8. Експорт результатів у формат KML.

Повний програмний код модуля

```
import xarray as xr

def load_sentinel(nc_file, var):
    ds = xr.open_dataset(nc_file)
    data = ds[var]
    lat = ds['latitude']
    lon = ds['longitude']
    mask = (
        (lat >= LAT_MIN) & (lat <= LAT_MAX) &
        (lon >= LON_MIN) & (lon <= LON_MAX)
    )
    return data.where(mask, drop=True) * 1e6, lat.where(mask, drop=True),
lon.where(mask, drop=True)

no2, lat, lon = load_sentinel('data/S5P_NO2.nc',
'nitrogen_dioxide_tropospheric_column')
```

```

so2, _, _ = load_sentinel('data/S5P_SO2.nc',
'sulfurdioxide_total_vertical_column')

# ERA5
era5 = xr.open_dataset('data/ERA5_wind.nc')
u10 = era5['u10']
v10 = era5['v10']
time = era5['time']

kml = simplekml.Kml()

for t in range(len(time)):
    current_time = np.datetime_as_string(time[t], unit='h')
    time_folder = kml.newfolder(name=f"Час: {current_time}")
    u = float(u10[t].mean())
    v = float(v10[t].mean())
    wind_spd, wind_dir = wind_speed_dir(u, v)

    for pollutant, data in {'NO2': no2, 'SO2': so2}.items():
        pol_folder = time_folder.newfolder(name=pollutant)
        for z in HEIGHTS:
            h_folder = pol_folder.newfolder(name=f"{z} м")
            for i in range(0, len(data.latitude), 6):
                for j in range(0, len(data.longitude), 6):
                    C0 = float(data[i, j])
                    if np.isnan(C0):
                        continue
                    C = vertical_profile(C0, z) / (wind_spd + 0.5)
                    p = h_folder.newpoint(coords=[(float(lon[i, j]), float(lat[i, j]), z)])
                    p.description = (
                        f"Забруднювач: {pollutant}

```

```

"
f"Час: {current_time}
"
f"Висота: {z} м
"
f"Концентрація: {C:.2f} мкг/м³
"
f"Швидкість вітру: {wind_spd:.1f} м/с"
)
p.style.iconstyle.color = color_scale(C)
ts = simplekml.TimeSpan()
ts.begin = current_time
ts.end = (datetime.fromisoformat(current_time) +
timedelta(hours=1)).isoformat()
p.timespan = ts

kml.save('sentinel_era5_air_pollution_dnipro.kml')

```

5.5 Інструкція користувача та практичне застосування

Для використання програмного модуля необхідно встановити Python та відповідні бібліотеки, підготувати супутникові та метеорологічні дані у форматі NetCDF, після чого виконати запуск скрипта. Отриманий KML-файл відкривається у Google Earth Pro та дозволяє здійснювати інтерактивний аналіз рівнів забруднення у просторі та часі.

Вибір супутникових даних Sentinel-5P як основного джерела інформації про атмосферне забруднення зумовлений його спеціалізованим призначенням для моніторингу хімічного складу атмосфери. Sentinel-5P є єдиним супутником програми Copernicus, основною метою якого є глобальне та регіональне спостереження за концентраціями газоподібних забруднювачів, що мають суттєвий вплив на якість атмосферного повітря та здоров'я населення.

Інструмент TROPOMI, встановлений на борту супутника, забезпечує вимірювання таких ключових атмосферних компонентів, як діоксид азоту (NO₂), діоксид сірки (SO₂), озон, чадний газ та аерозолі. Саме NO₂ і SO₂ є індикаторами інтенсивних антропогенних процесів, включаючи роботу промислових підприємств, енергетичних об'єктів, транспортних систем, а також наслідки бойових дій, пожеж і вибухів, що робить їх особливо релевантними для дослідження в умовах воєнного стану.

Перевагою Sentinel-5P є щоденне глобальне покриття, що дозволяє отримувати регулярні оновлення даних для будь-якого регіону, зокрема для території України, незалежно від стану наземної інфраструктури. Це є критично важливим у ситуаціях, коли стаціонарні пости моніторингу знищені або не функціонують. Крім того, дані Sentinel-5P є відкритими та безкоштовними, що відповідає принципам відкритої науки та дозволяє забезпечити відтворюваність результатів дослідження.

Просторова роздільна здатність даних Sentinel-5P (приблизно 7 × 3,5 км) є достатньою для регіонального аналізу та виявлення зон підвищеного забруднення, що відповідає масштабам дослідження, обраним у даній магістерській роботі.

Точність результатів, отриманих на основі супутникових даних Sentinel-5P, визначається як характеристиками самого інструмента TROPOMI, так і методами обробки та інтерпретації даних. За результатами численних міжнародних досліджень встановлено, що супутникові вимірювання NO₂ та SO₂ добре корелюють з даними наземних станцій, особливо при аналізі просторових і часових трендів.

Варто підкреслити, що супутникові дані забезпечують високу відносну точність, тобто дозволяють достовірно визначати зони з підвищеним або зниженим рівнем забруднення, а також відстежувати динаміку змін концентрацій у часі. Саме така інформація є найбільш цінною для регіонального моніторингу та екологічного аналізу в умовах обмеженого доступу до наземних спостережень.

Інтеграція супутникових даних з метеорологічним реаналізом ERA5 у межах програмного модуля дозволяє підвищити інтерпретаційну точність результатів за рахунок урахування впливу атмосферної циркуляції. Врахування швидкості та напрямку вітру зменшує похибки, пов'язані з локальним накопиченням забруднювачів, та дозволяє більш адекватно відобразити процеси їх перенесення.

Водночас отримані концентрації слід розглядати не як абсолютні приземні значення, а як модельні оцінки, що відображають відносний рівень забруднення та його просторово-часову структуру. Такий підхід є загальноприйнятим у супутниковій екології та широко використовується у прикладних дослідженнях.

Незважаючи на численні переваги, застосований метод має низку обмежень, які необхідно враховувати при інтерпретації результатів. Насамперед, супутникові дані Sentinel-5P відображають колонні концентрації забруднювачів, тобто інтегровані значення по всій товщі атмосфери. Це унеможлиблює пряме визначення приземних концентрацій без застосування додаткових моделей або емпіричних коефіцієнтів.

Ще одним обмеженням є відносно низька просторова роздільна здатність супутникових даних, яка не дозволяє аналізувати забруднення на рівні окремих вулиць або локальних джерел викидів. У зв'язку з цим розроблений програмний модуль орієнтований на регіональний, а не локальний масштаб аналізу.

Суттєвий вплив на якість супутникових спостережень мають метеорологічні умови, зокрема хмарність, що може призводити до пропусків даних або зниження їх точності. Крім того, дані Sentinel-5P не є даними реального часу у строгому сенсі, оскільки між моментом спостереження та публікацією даних існує часовий лаг.

Вертикальний розподіл концентрацій у програмному модулі описується спрощеною експоненціальною моделлю, яка не враховує складні турбулентні процеси, температурні інверсії та вплив рельєфу. Це обмежує точність оцінок на конкретних висотах, однак не знижує інформативність загальної просторово-часової картини.

Таким чином, запропонований підхід доцільно розглядати як інструмент оперативного екологічного аналізу та підтримки прийняття рішень, а не як заміну детальних інженерних моделей атмосферного перенесення. Його основною перевагою є можливість отримання узагальненої, наочної та актуальної інформації про стан атмосферного повітря в умовах обмеженого доступу до традиційних засобів моніторингу, що є особливо важливим у період воєнного стану.

Розроблений програмний модуль призначений для обробки супутникових і метеорологічних даних з метою оцінки та візуалізації просторово-часового розподілу атмосферного забруднення. Реалізація програмного забезпечення здійснена мовою програмування Python, що забезпечує високу гнучкість, кросплатформеність та доступ до широкого спектра наукових і геоінформаційних бібліотек.

Вибір програмних бібліотек та їх функціональне призначення

У програмному модулі використано низку спеціалізованих бібліотек, кожна з яких виконує чітко визначену функцію в загальному ланцюзі обробки даних.

Бібліотека **xarray** застосовується для роботи з багатовимірними масивами даних у форматі NetCDF, що є стандартним форматом зберігання супутникових та метеорологічних продуктів. Вона забезпечує зручний доступ до змінних, координат та метаданих, а також дозволяє здійснювати фільтрацію та агрегацію даних у просторовому й часовому вимірах.

Бібліотека **numpy** використовується для виконання чисельних обчислень, зокрема реалізації математичних моделей вертикального розподілу концентрацій забруднювачів, обчислення швидкості вітру та виконання елементарних статистичних операцій.

Для формування результатів у форматі, сумісному з геоінформаційними системами, застосовується бібліотека **simplekml**, яка дозволяє програмно створювати KML-файли для подальшої візуалізації в середовищі Google Earth. Дана бібліотека підтримує створення ієрархічної структури шарів, задання стилів, кольорів, а також часових інтервалів для анімації.

Модуль **datetime** стандартної бібліотеки Python використовується для роботи з часовими мітками та формування часових інтервалів (TimeSpan), необхідних для реалізації часової анімації у Google Earth.

Програмний код має послідовну та логічно структуровану побудову, що полегшує його розуміння та подальшу модифікацію. На початковому етапі у коді задаються глобальні параметри, зокрема географічні межі досліджуваної території, перелік висотних рівнів та допоміжні коефіцієнти моделей. Це дозволяє швидко адаптувати програму до іншого регіону без зміни основної логіки роботи.

Наступним кроком є визначення допоміжних функцій, які реалізують окремі елементи обчислювального процесу. До таких функцій належить функція вертикального розподілу концентрацій, що базується на експоненціальній залежності, а також функція розрахунку швидкості та напрямку вітру на основі його компонент.

Окрему групу функцій становлять процедури завантаження та попередньої обробки вхідних даних. У цих функціях здійснюється відкриття файлів Sentinel-5P, вибір необхідних змінних, фільтрація даних за географічними координатами та приведення значень до умовних одиниць, придатних для подальшого аналізу. Аналогічним чином завантажуються метеорологічні дані ERA5, з яких вибираються компоненти швидкості вітру та часові мітки.

Основна частина програмного коду реалізує ітераційний алгоритм, який проходить по часових кроках метеорологічних даних. Для кожного часового зрізу визначаються середні значення швидкості та напрямку вітру, після чого здійснюється корекція концентрацій забруднювачів з урахуванням впливу атмосферної циркуляції.

Для кожного забруднювача та кожного висотного рівня виконується розрахунок скоригованої концентрації, яка далі прив'язується до відповідних географічних координат. У процесі формування результатів створюються точкові об'єкти KML, для яких задаються просторові координати, висота розташування, описова інформація та стиль відображення. Колір маркерів

визначається на основі порогових значень концентрацій, що забезпечує наочну візуалізацію рівнів забруднення.

Однією з ключових особливостей розробленого програмного модуля є підтримка часової анімації результатів. Для цього кожному об'єкту KML задається часовий інтервал відображення, що відповідає конкретному часовому кроку метеорологічних даних. У середовищі Google Earth це дозволяє відтворювати динаміку поширення забруднювачів у часі за допомогою вбудованої шкали часу.

Ієрархічна структура KML-файлу забезпечує зручну навігацію між шарами, що відповідають різним забруднювачам, висотним рівням та часовим інтервалам. Такий підхід поєднує переваги тривимірної візуалізації та часової анімації, що суттєво підвищує інформативність результатів аналізу.

Для використання програмного модуля необхідно встановити інтерпретатор Python та відповідні бібліотеки, підготувати вхідні файли супутникових і метеорологічних даних та запустити програму у середовищі командного рядка або інтегрованого середовища розробки. Результатом роботи програми є KML-файл, який може бути відкритий у Google Earth Pro без додаткових налаштувань.

Таким чином, розроблений програмний модуль реалізує повний цикл обробки даних – від завантаження супутникової інформації до інтерактивної ГІС-візуалізації результатів – і може розглядатися як ефективний інструмент для аналізу атмосферного забруднення в умовах обмеженого доступу до традиційних засобів моніторингу.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПРИ ВИКОНАННІ ГІС-АНАЛІЗУ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ

6.1 Загальні вимоги нормативних актів щодо управління охороною праці та безпекою у надзвичайних ситуаціях для підприємств, установ та працівників, що здійснюють ГІС-дослідження

Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях є системоутворюючими елементами сталого функціонування підприємств та установ, діяльність яких пов'язана з аналізом просторових даних, геоінформаційними технологіями та екологічним моніторингом. В умовах повномасштабної війни в Україні ці питання набувають критичного значення, оскільки поєднують у собі як традиційні виробничі ризики, так і нові загрози, спричинені воєнними діями.

Нормативно-правову основу управління охороною праці в Україні становить Закон України «Про охорону праці», який визначає правові, соціально-економічні та організаційні засади забезпечення безпечних і здорових умов праці. Закон зобов'язує роботодавця створити умови, що відповідають вимогам безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, а також забезпечити функціонування системи управління охороною праці.

У сфері безпеки у надзвичайних ситуаціях ключовим нормативним документом є Кодекс цивільного захисту України. Він регламентує організацію цивільного захисту на підприємствах, порядок дій персоналу у разі виникнення надзвичайних ситуацій природного, техногенного або воєнного характеру, а також визначає механізми взаємодії з органами державної влади та місцевого самоврядування.

Для підприємств і наукових підрозділів, що виконують ГІС-аналіз забруднення атмосфери, особливо актуальними є:

- державні санітарні норми щодо роботи з персональними електронно-обчислювальними машинами;
- нормативи допустимих рівнів шуму, вібрації та електромагнітного випромінювання;
- вимоги до організації робочих місць аналітиків, операторів ГІС та фахівців з дистанційного зондування Землі.

В умовах воєнного стану додатково застосовуються норми законодавства щодо:

- організації трудових відносин у період воєнного стану;
- режиму роботи під час повітряних тривог;
- забезпечення укриттів та безпечної евакуації персоналу;
- захисту критичної інформаційної інфраструктури, включаючи геоінформаційні системи та бази даних.

Таким чином, система управління охороною праці та безпекою у надзвичайних ситуаціях у межах даної роботи розглядається як комплексна, багаторівнева структура, що поєднує правові, організаційні, технічні та інформаційні заходи.

6.2 Постановка завдання щодо досліджень з питань охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях у контексті виконання ГІС-аналізу забруднення атмосфери

Метою даного розділу є всебічне дослідження умов праці та рівня безпеки працівників, задіяних у виконанні геоінформаційного аналізу забруднення атмосферного повітря в Україні в умовах воєнного стану.

Завданнями розділу є:

- ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів, характерних для ГІС-досліджень;
- аналіз впливу воєнних дій на умови праці фахівців;
- оцінка ризиків виникнення надзвичайних ситуацій та їх наслідків;

- розробка заходів щодо зниження професійних ризиків та підвищення рівня готовності до надзвичайних ситуацій;
- обґрунтування ролі ГІС як інструменту підтримки рішень у сфері охорони праці та цивільного захисту.

Особливість постановки завдання полягає у міждисциплінарному характері дослідження, яке поєднує елементи охорони праці, цивільного захисту, геоінформатики та екологічного моніторингу.

6.3 Аналітично-розрахункова частина з питань охорони праці при виконанні ГІС-аналізу

Праця фахівців, що виконують ГІС-аналіз забруднення атмосфери, належить до категорії інтелектуальної та операторської діяльності з високою часткою роботи за комп'ютером. Основними шкідливими факторами є:

- тривале статичне навантаження;
- напруження зору;
- вплив електромагнітних полів;
- психоемоційне навантаження, посилене умовами війни;
- порушення режиму праці та відпочинку.

Аналіз мікроклімату та освітлення

Оптимальні параметри мікроклімату (температура, вологість, швидкість руху повітря) мають вирішальне значення для збереження працездатності фахівців ГІС. Недотримання цих параметрів може призвести до зниження концентрації уваги та збільшення ймовірності помилок у просторовому аналізі.

Освітлення робочих місць повинно забезпечувати рівномірний світловий потік без відблисків на екрані монітора. Використання природного та комбінованого освітлення знижує навантаження на зоровий аналізатор.

Ергономіка робочого місця

Рациональна організація робочого місця аналітика ГІС включає:

- регульоване крісло з підтримкою хребта;
- оптимальну висоту столу;

- правильне розташування монітора відносно очей;
- використання додаткових засобів (підставки, ергономічні клавіатури).

Ці заходи сприяють профілактиці професійних захворювань опорно-рухового апарату.

Режим праці та відпочинку

Для зменшення втоми рекомендовано:

- регламентовані перерви;
- чергування видів діяльності;
- виконання вправ для очей та м'язів.

У воєнний період до цього додається необхідність психологічної підтримки персоналу.

6.4 Аналітично-розрахункова частина з питань безпеки у надзвичайних ситуаціях (цивільного захисту) з урахуванням воєнних загроз

В умовах війни спектр надзвичайних ситуацій значно розширюється. Для підприємств та установ, що здійснюють ГІС-дослідження, основними загрозами є:

- ракетні та артилерійські обстріли;
- руйнування будівель та інфраструктури;
- пожежі;
- відключення електропостачання та зв'язку;
- кібератаки на інформаційні системи.

Організація цивільного захисту

Система цивільного захисту повинна включати:

- плани евакуації;
- схеми укриттів;
- порядок дій під час повітряної тривоги;
- резервне живлення для критичних ГІС-серверів;
- дублювання та архівацію просторових даних.

Роль ГІС у цивільному захисті

Геоінформаційні системи можуть використовуватися для:

- картографування укриттів;
- аналізу зон ураження;
- планування маршрутів евакуації;
- оцінки ризиків для персоналу.

Таким чином, ГІС виступає не лише об'єктом захисту, але й інструментом забезпечення безпеки.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі комплексно досліджено проблему оцінки рівня забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій із застосуванням методів геоінформаційного аналізу. Актуальність обраної теми зумовлена безпрецедентним впливом війни на стан довкілля України, порушенням традиційних систем екологічного моніторингу та необхідністю оперативного отримання достовірної просторової інформації для підтримки управлінських рішень.

У ході виконання дослідження досягнуто поставленої мети та вирішено всі сформульовані завдання, що дозволяє зробити такі узагальнюючі висновки.

У першому розділі встановлено, що сучасні підходи до моніторингу атмосферного повітря в умовах війни потребують перегляду та адаптації. Традиційні наземні системи спостережень, які є основою екологічного контролю в мирний час, виявляються недостатніми через фізичне руйнування постів моніторингу, окупацію територій та небезпеку для персоналу. Доведено, що воєнні дії формують специфічні джерела забруднення атмосфери, зокрема пожежі, вибухи, руйнування промислових та енергетичних об'єктів, які мають високий рівень токсичності та просторово-часову мінливість.

Проаналізовано роль геоінформаційних систем як ключового інструменту інтеграції різномірних даних — супутникових, наземних, метеорологічних та аналітичних. Обґрунтовано, що саме ГІС-аналіз дозволяє виявляти просторові закономірності забруднення атмосферного повітря, оцінювати масштаби екологічних загроз і формувати адаптивні моделі оцінки ризиків. Особливу увагу приділено необхідності переходу від виключно нормативного підходу до ризик-орієнтованих і порогових методів оцінки якості повітря, що є критично важливим в умовах війни.

У другому розділі розроблено та апробовано методика геоінформаційного аналізу забруднення атмосферного повітря, яка базується на інтеграції супутникових даних дистанційного зондування Землі, результатів наземних

вимірювань та просторово-статистичних методів. Обґрунтовано вибір методів просторової інтерполяції (IDW, крігінг), кластерного аналізу та порогової оцінки як основних інструментів дослідження.

Встановлено, що методи IDW є доцільними для оперативного аналізу за обмеженої кількості даних, тоді як геостатистичні методи (крігінг) забезпечують вищу точність і дозволяють оцінювати невизначеність результатів за наявності щільної мережі спостережень. Кластерний аналіз довів свою ефективність у типізації територій за рівнем забруднення та став основою для подальшого визначення порогових значень.

Результати просторово-статистичного аналізу підтвердили наявність значної просторової неоднорідності забруднення атмосферного повітря, що зумовлена як антропогенними, так і воєнними чинниками. Доведено, що використання ГІС дозволяє компенсувати дефіцит наземних даних та забезпечити цілісне бачення екологічної ситуації навіть у зонах активних бойових дій.

У третьому розділі здійснено визначення порогових значень рівнів забруднення атмосферного повітря з урахуванням просторових особливостей воєнного впливу. Вперше для умов воєнного часу в Україні порогові значення обґрунтовано не лише на основі чинних нормативів гранично допустимих концентрацій, а й із застосуванням статистичних і просторових критеріїв.

Виділено три основні рівні забруднення атмосфери: допустимий, підвищений та небезпечний. Доведено, що такий підхід дозволяє більш адекватно відображати реальний екологічний стан територій у порівнянні з класичними нормативними оцінками. Картографічне моделювання зон екологічної небезпеки підтвердило ефективність застосування ГІС для ідентифікації територій із критичним рівнем екологічного ризику.

Отримані результати мають важливе практичне значення для органів державного управління, екологічних служб та органів місцевого самоврядування, оскільки можуть використовуватися для пріоритетного планування заходів екологічного реагування та післявоєнного відновлення територій.

У четвертому розділі обґрунтовано ключову роль програмного забезпечення ГІС та інтерактивних методів аналізу в умовах війни. Проведена класифікація ГІС-платформ показала, що настільні ГІС (QGIS, ArcGIS) є базовим інструментом для глибокого просторового аналізу та моделювання, тоді як веб-ГІС і інтерактивні онлайн-платформи забезпечують оперативність, відкритість і доступність екологічної інформації для широкого кола користувачів.

Доведено, що інтерактивні методи ГІС-аналізу, зокрема дашборди, веб-карти та сервіси просторової аналітики, мають вирішальне значення для оперативного моніторингу забруднення атмосферного повітря та підтримки прийняття рішень в умовах обмеженого часу та ресурсів. Разом із тим визначено низку обмежень застосування ГІС-інструментів у воєнний період, зокрема дефіцит даних, проблеми точності та інформаційної безпеки.

Окреслено перспективи розвитку ГІС-технологій у післявоєнний період, зокрема розширення мереж екологічного моніторингу, впровадження автоматизованих систем аналізу та використання штучного інтелекту для прогнозування екологічних ризиків.

У процесі виконання роботи досягнуто поставленої мети та вирішено комплекс наукових і практичних завдань, що підтверджує цілісність і логічну завершеність дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1) Kyiv School of Economics (2022) [Електронний ресурс], — Прямий збиток, завданий інфраструктурі України під час війни, сягнув понад 105,5 мільярдів доларів США, <https://kse.ua/about-the-school/news/direct-damage-caused-to-ukraine-s-infrastructure-during-the-war-has-reached-over-105-5-billion/>
- 2) Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів (2022) [Електронний ресурс], «Шкода природним заповідникам та заповідним екосистемам», <https://mepr.gov.ua/en/news/39144.html>.
- 3) Інструкція про порядок та критерії взяття на державний облік об'єктів, які справляють або можуть справити шкідливий вплив на здоров'я людей і стан атмосферного повітря, видів та обсягів забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферне повітря, затверджена наказом Міндовкілля від 10 травня 2002 року № 177. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0061-95>
- 4) EU4Environment (2022 Forthcoming), «На шляху до зеленої трансформації України: поточний стан у 2021 р. Моніторинг прогресу на основі показників зеленого зростання ОЕСР»
- 5) Регламент ЄС № 691/2011 від 06 липня 2011 року "Про Європейську систему еколого-економічних рахунків". URL: [http://www.dst.dk/ext/322569151/0/ukraine/UKR_Proposal-amendingCOMMISSION-REGULATION-\(EC\)-No-691_2011-doc](http://www.dst.dk/ext/322569151/0/ukraine/UKR_Proposal-amendingCOMMISSION-REGULATION-(EC)-No-691_2011-doc)
- 6) ОЕСД/ВОЗ (2015), «Економічна вартість наслідків забруднення повітря для здоров'я в Європі. Чисте повітря, здоров'я та добробут» — Режим доступу: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/276772/Economic-cost-health-impactair-pollution-en.pdf
- 7) Solarin SA, Al-Mulati U, Ozturk I. Determinants of pollution and the role of the military sector: evidence from a maximum likelihood approach with two structural breaks in the USA. Environ Sci Pollut Res 2018;25:30949–33096.
- 8) Bordeleau G, et al. Environmental impacts of training activities at an air weapons range. J Environ Qual 2008;37:308–317.

9) Wang KH та ін. Чи впливають залежність від сирової нафти та викиди CO₂ та військові витрати в країнах-імпортерах нафти? Енергетична політика 2021;153:112281.

10) Удалов, І. В. Еколого-геологічна оцінка впливу техногенного карстоутворення на навколишнє середовище м. Слов'янськ [Текст] / І. В. Удалов, О. В. Чубар // Вісник НТУ "ХП", Хімія, хімічна технологія та екологія . - 2011. - № 59. - С. 111-118.

11) Індекс забруднення атмосфери // Словник-довідник з екології : навч.-метод. посіб. / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. — Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2013. — С. 102.

12) Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 166 с.

13) Зак Юрий Александрович. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-технологии. — М.: «ЛИБРОКОМ», 2013. — 352 с.

14) Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH/ - СПб.: Санкт-Петербург, 2005 – 736 с.

15) Географічна інформація – Еталонна модель: Нац. стандарт України (ДСТУ ISO 19101:2002(E)). – К. : Держспоживстандарт України, 2005. – 65 с.

16) Дистанційне зондування Землі з космосу. Цифрова обробка зображень/ Кашкін В.Б., Сухінін А.І./ Логос, 2001. — 12 с

17) Морозов В. В. Моделирование та прогнозування для проектів геоінформаційних систем / В. В. Морозов, С. Я. Плоткін, М. Г. Поляков та ін. – Херсон : ХДУ, 2007. – 328 с.

18) Світличний О.О., Плотницький С.В. Основи геоінформатики: навчальний посібник/ За заг. ред. О.О. Світличного. - Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. - 295 с.

19) Бугаевский Л.М., Цветков В.Я. Геоинформационные системы: Учебное пособие для вузов. М.: 2000. – 222 с